



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

JONATHAN ALVES REBOUÇAS

**ESTUDO ISOTÓPICO E GEOMORFOLÓGICO DE SETE RESERVATÓRIOS DA
BACIA DO BANABUIÚ**

FORTALEZA

2013

JONATHAN ALVES REBOUÇAS

ESTUDO ISOTÓPICO E GEOMORFOLÓGICO DE SETE RESERVATÓRIOS DA
BACIA DO BANABUIÚ

Dissertação submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração – Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido Cearense, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Julien Daniel Pierre
Burte

FORTALEZA

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- R24e Rebouças, Jonathan Alves.
 Estudo isotópico e geomorfológico de sete reservatórios da Bacia Banabuiú / Jonathan Alves
Rebouças. – 2013.
 144 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias,
Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola,
Fortaleza, 2013.
 Área de Concentração: Manejo e conservação de bacias hidrográficas no Semiárido.
 Orientação: Prof. Dr. Julien Daniel Pierre Burté.
1. Recursos hídricos. 2. Isótopos. 3. Evaporação. I. Título.

JONATHAN ALVES REBOUÇAS

ESTUDO ISOTÓPICO E GEOMORFOLÓGICO DE SETE RESERVATÓRIOS DA
BACIA DO BANABUIÚ

Dissertação submetida à Coordenação do
Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, Área de Concentração – Manejo
e Conservação de Bacias Hidrográficas
no Semiárido Cearense, como requisito
parcial para a obtenção do Grau de
Mestre.

Aprovada em: 12/03/2013

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. George Leite Mamede
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Prof. Dr. Horst Frischkorn
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr^a. Maria Marlúcia F. Santiago
Universidade Federal do Ceará (UFC)

RESUMO

Os pequenos reservatórios ainda são a principal fonte de água do pequeno agricultor. A sensibilidade desses pequenos recursos hídricos às altas taxas de evaporação já é algo bastante conhecido, porém estudos que tratam de forma individualizada esses recursos ainda são escassos. Isso se deve à comodidade que estações automáticas trazem ao monitoramento da lâmina evaporada por meio de variáveis meteorológicas mas que traz sérias consequências para a gestão desses pequenos recursos, uma vez que não representam as condições geomorfológicas e climáticas nas quais esses reservatórios estão inseridos. Esse trabalho realiza um estudo individualizado de sete reservatórios localizados na bacia do Banabuíú-CE, ele baseia-se na avaliação das condições geomorfológicas nas quais os açudes estão inseridos e na estimativa da lâmina evaporada, para cada um dos sete reservatórios, utilizando o método isotópico. Esse método se mostrou indicado para o estudo uma vez que se propõe a individualizar o corpo hídrico por meio de uma assinatura isotópica de sua água. Os resultados indicaram que existem diferenças não desprezíveis nos valores de lâmina evaporada para cada reservatório, que podem chegar até 50%. Além da diferença entre as lâminas evaporadas, o estudo mostra que métodos de simplificação usados para a estimativa do volume armazenado em pequenos reservatórios podem superestimá-los, uma vez que foram encontrados reservatórios com capacidade 10 vezes menores mas com características morfométricas de grandes reservatórios.

Palavras-chave: Geomorfologia, Isótopos Ambientais, Evaporação.

ABSTRACT

Smaller reservoirs are still the main source of water of the small farmer. The sensitivity of these small water high rates of evaporation is something already well known. However, studies dealing individually these resources are still scarce. This is due to the convenience it brings to monitoring stations automatic blade evaporated by the meteorological variables. This convenience has serious consequences regarding the management of these small features, since it does not represent the geomorphological and climatic conditions in which these reservoirs are inserted. This paper conducts an individualized study of seven reservoirs that lie in the basin of Banabuiú-EC. The study is based on assessment of the geomorphological in which the reservoirs are inserted and estimating the blade evaporated for each of seven reservoirs using isotopic method. This method was suitable for the study since it intends to individualize the water body through an isotopic signature of its water. The results indicated that non-negligible differences in the amounts of evaporated blade for each reservoir, which may reach 50%. Besides the difference between the blade evaporated study shows that simplification methods used to estimate the volume stored in small tanks can overestimate them, since they have been found reservoirs with a capacity 10 times smaller but with morphometric characteristics of large reservoirs.

Keywords: Geomorphology, Environmental Isotopes, Evaporation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Bacia do Banabuiú.	23
Figura 2 – O mapa da esquerda corresponde as manchas geológicas encontradas ao longo da bacia do Banabuiú.	25
Figura 3 – Açudes monitorados pela COGERH que se encontram dentro da bacia do Banabuiú.	25
Figura 4 - Área de estudo. Bacia do Riacho da Forquilha e reservatórios estudados.	27
Figura 5 – Cultivos de vazante no açude da Lagoa Cercada.	31
Figura 6 – Representação geométrica piramidal de um reservatório.	33
Figura 7 – Média das pluviometrias dos postos da região de Quixeramobim-CE para o período que vai de janeiro de 2011 até setembro de 2012.	35
Figura 8 – Valores das médias mensais da umidade relativa do ar (ha) e da temperatura (T) para o período em estudo.	38
Figura 9 – Desenvolvimento do simplex sobre a superfície de resposta durante uma otimização.	41
Figura 10 – Distribuição de pontos sobre a superfície de resposta a aplicação do método de otimização Differential Evolution.	44
Figura 11 – Figura simplex montada a partir de inícios aleatórios.	45
Figura 12 – Estação pluviométrica e de temperatura do ar localizada dentro da sub-bacia do riacho da Forquilha.	46
Figura 13 – Gráficos de temperatura (T), lâmina evaporada segundo o método do evaporímetro de Pichê (E) e a umidade relativa do ar (ha) para o período que se estende de janeiro de 2011 até setembro de 2012.	48
Figura 14 – Régua linimétrica instalada para a medição de nível nos açudes. (a) Açude da Lagoa Cercada, (b) Açude do Cambito, (c) Açude do Riacho Verde, (d) Açude do Algodão, (e) Açude da Campina, (f) Açude da Vista Alegre.	50
Figura 15 – Modelo do ecobatímetro utilizado durante a batimetria dos reservatórios.	51
Figura 16 – Barco utilizado durante as campanhas de batimetria.	51

Figura 17- Modelo montado para a confecção da CAV no ArcGIS 9.3.	53
Figura 18 - Garrafa usada para coletas isotópicas.	54
Figura 19 -(a) Curvas de nível geradas a partir da interpolação da malha de pontos (b) Corresponde a malha de pontos obtida durante a batimetria.	61
Figura 20 - Curvas CAV do açude do Cambito.....	62
Figura 21- (a) Corresponde a malha de pontos obtida durante a batimetria. (b) Curvas de nível geradas a partir da interpolação da malha de pontos.....	63
Figura 22 - Curvas CAV do açude do Riacho Verde.....	64
Figura 23- (a) Curvas de nível geradas a partir da interpolação da malha de pontos. (b) Corresponde a malha de pontos obtida durante a batimetria.	65
Figura 24 - Curva CAV do açude Lagoa Cercada.	66
Figura 25 - Histogramas das cotas levantadas durante a batimetria no açude Lagoa Cercada.....	67
Figura 26 - (a) Curvas de nível geradas a partir da interpolação da malha de pontos (b). Corresponde a malha de pontos obtida durante a batimetria.	68
Figura 27 - Curva CAV do açude Vista Alegre.	69
Figura 28 - (a) Curvas de nível geradas a partir da interpolação da malha de pontos (b). Corresponde a malha de pontos obtida durante a batimetria.	70
Figura 29 - Curva CAV do açude da Campina.	71
Figura 30 – Curva CAV do açude Algodão.....	72
Figura 31 – curva CAV do açude Fogareiro.	73
Figura 32 - A figura mostra a relação entre todas as combinações possíveis de NSE's, para o açude do Cambito, em diferentes escalas.	77
Figura 33 - (a) Gráfico que mostra o ajuste do modelo com os dados medidos para a variável de saída área. (b) mostra o ajuste para o volume do reservatório.	78
Figura 34 - Perfis transversais do açude do cambito.....	80
Figura 35 – A figura mostra a relação entre todas as combinações possíveis de NSE's, para o açude do Riacho Verde, em diferentes escalas.	82
Figura 36-(a) Gráfico que mostra o ajuste do modelo com os dados medidos para a variável de saída área. (b) mostra o ajuste para o volume do reservatório.	83
Figura 37- Perfis transversais do açude do Riacho Verde.....	84

Figura 38 – A figura mostra a relação entre todas as combinações possíveis de NSE's, para o açude da Lagoa Cercada, em diferentes escalas.	86
Figura 39-(a) Gráfico que mostra o ajuste do modelo com os dados medidos para a variável de saída área. (b) mostra o ajuste para o volume do reservatório.	87
Figura 40- Perfis transversais do açude Lagoa Cercada.	88
Figura 41 - A figura mostra a relação entre todas as combinações possíveis de NSE's, para o açude da Vista Alegre, em diferentes escalas.	90
Figura 42-(a) Gráfico que mostra o ajuste do modelo com os dados medidos para a variável de saída área. (b) mostra o ajuste para o volume do reservatório.	91
Figura 43- Perfis transversais do açude da Vista Alegre.	92
Figura 44 - A figura mostra a relação entre todas as combinações possíveis de NSE's, para o açude da Campina, em diferentes escalas.	94
Figura 45-(a) Gráfico que mostra o ajuste do modelo com os dados medidos para a variável de saída área. (b) mostra o ajuste para o volume do reservatório.	95
Figura 46 - A figura mostra a relação entre todas as combinações possíveis de NSE's, para o açude do Algodão, em diferentes escalas.....	98
Figura 47-(a) Gráfico que mostra o ajuste do modelo com os dados medidos para a variável de saída área. (b) mostra o ajuste para o volume do reservatório.	99
Figura 48 - A figura mostra a relação entre todas as combinações possíveis de NSE's, para o açude do Fogareiro, em diferentes escalas.	101
Figura 49-(a) Gráfico que mostra o ajuste do modelo com os dados medidos para a variável de saída área. (b) mostra o ajuste para o volume do reservatório.	102
Figura 50 – Relação entre os valores de α e K otimizados.....	107
Figura 51 – A esquerda está o gráfico da variação percentual da função objetivo em relação ao seu ótimo contra a variação do parâmetro a em relação ao seu ótimo. No gráfico a direita é mostrada a relação entre a variação percentual da função objetivo em relação ao seu valor ótimo e a variação percentual do parâmetro K em relação ao seu ótimo. Esses gráficos são para o açude do Cambito.	108

- Figura 52– A esquerda está o gráfico da variação percentual da função objetivo em relação ao seu ótimo contra a variação do parâmetro a em relação ao seu ótimo. No gráfico a direita é mostrada a relação entre a variação percentual da função objetivo em relação ao seu valor ótimo e a variação percentual do parâmetro K em relação ao seu ótimo. Esses gráficos são para o açude do Riacho Verde. 110
- Figura 53– A esquerda está o gráfico da variação percentual da função objetivo em relação ao seu ótimo contra a variação do parâmetro a em relação ao seu ótimo. No gráfico a direita é mostrada a relação entre a variação percentual da função objetivo em relação ao seu valor ótimo e a variação percentual do parâmetro K em relação ao seu ótimo. Esses gráficos são para o açude da Lagoa Cercada. 111
- Figura 54– A esquerda está o gráfico da variação percentual da função objetivo em relação ao seu ótimo contra a variação do parâmetro a em relação ao seu ótimo. No gráfico a direita é mostrada a relação entre a variação percentual da função objetivo em relação ao seu valor ótimo e a variação percentual do parâmetro K em relação ao seu ótimo. Esses gráficos são para o açude da Vista Alegre. 112
- Figura 55– A esquerda está o gráfico da variação percentual da função objetivo em relação ao seu ótimo contra a variação do parâmetro a em relação ao seu ótimo. No gráfico a direita é mostrada a relação entre a variação percentual da função objetivo em relação ao seu valor ótimo e a variação percentual do parâmetro K em relação ao seu ótimo. Esses gráficos são para o açude da Campina. 114
- Figura 56– A esquerda está o gráfico da variação percentual da função objetivo em relação ao seu ótimo contra a variação do parâmetro a em relação ao seu ótimo. No gráfico a direita é mostrada a relação entre a variação percentual da função objetivo em relação ao seu valor ótimo e a variação percentual do parâmetro K em relação ao seu ótimo. Esses gráficos são para o açude do Algodão. 115
- Figura 57– A esquerda está o gráfico da variação percentual da função objetivo em relação ao seu ótimo contra a variação do parâmetro a em relação ao seu ótimo. No gráfico a direita é mostrada a relação entre a variação percentual da função objetivo em relação ao seu valor ótimo e a variação

percentual do parâmetro K em relação ao seu ótimo. Esses gráficos são para o açude do Fogareiro.	116
Figura 58 – Gráfico contendo as curvas de sensibilidade para o parâmetro ‘a’ para os diferentes açudes.	118
Figura 59 – Gráfico contendo as curvas de sensibilidade para o parâmetro α para os diferentes açudes.	119
Figura 60 - Curva de rebaixamento do Açude do Cambito.	120
Figura 61 - Curva de rebaixamento do Açude do Riacho Verde.	121
Figura 62 - Curva de rebaixamento do Açude da Lagoa Cercada.	123
Figura 63 - Curva de rebaixamento do Açude da Vista Alegre.	124
Figura 64 - Curva de rebaixamento do Açude da Campina.	126
Figura 65 - Curva de rebaixamento do Açude da Campina.	127
Figura 66 - Curva de rebaixamento do Açude da Campina.	128
Figura 67 - Média dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ dos sete açudes.	129
Figura 68 – Média das TVI do açudes para o período de coleta.	131
Figura 69 - Dados de lâmina evaporada mensal para cada um dos sete reservatórios estudados.	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação dos açudes monitorados durante o estudo seguidos de suas variáveis geométricas: Hmax (profundidade máxima), Smax (espelho d'água máximo) e Vmax (volume de água máximo).	31
Tabela 2 – Valores de referência para o parâmetro K.	34
Tabela 3 – Valores de referência para o parâmetro α	34
Tabela 4 – Relação dos postos e das pluviometrias mensais para os anos de 2011 e 2012.	47
Tabela 5 - Detalhes das batimetrias realizadas nos açudes em estudo	60
Tabela 6 – A tabela mostra o Volume máximo, área de espelho d'água máxima e a profundidade máxima encontradas para cada açude.	73
Tabela 7 – A tabela mostra os dados estimados por BURTE (2008) de volume e área. Vb, Vj e Aj são, respectivamente, o volume máximo encontrado por BURTE (2008), o volume encontrado nesse trabalho e a área máxima encontrada nesse trabalho.....	74
Tabela 8 - Relação dos Métodos de otimização utilizados seguido dos parâmetros obtidos durante a otimização para o açude do Cambito.	75
Tabela 9 - Relação dos Métodos de otimização utilizados seguido dos parâmetros obtidos durante a otimização para o açude do Riacho Verde.....	81
Tabela 10 - Relação dos Métodos de otimização utilizados e os respectivos valores das funções objetivo encontrados para o açude da Lagoa Cercada.....	85
Tabela 11 - Relação dos Métodos de otimização utilizados e os respectivos valores das funções objetivo encontrados para o açude da Vista Alegre.....	89
Tabela 12 - Relação dos Métodos de otimização utilizados e os respectivos valores das funções objetivo encontrados para o açude da Lagoa Cercada.....	93
Tabela 13 - Relação dos Métodos de otimização utilizados e os respectivos valores das funções objetivo encontrados para o açude da Lagoa Cercada.....	97
Tabela 14 - Relação dos Métodos de otimização utilizados e os respectivos valores das funções objetivo encontrados para o açude do Fogareiro.....	100

Tabela 15 – A tabela mostra os valores de FO, NSE_A , NSE_V , α_{vxa} e K_{vxa} encontrados para cada açude.	103
Tabela 16 - Resultado da sensibilidade de cada parâmetro seguido da variação utilizada.....	108
Tabela 17- Resultado da sensibilidade de cada parâmetro seguido da variação utilizada.....	110
Tabela 18- Resultado da sensibilidade de cada parâmetro seguido da variação utilizada.....	111
Tabela 19 - Resultado da sensibilidade de cada parâmetro seguido da variação utilizada.....	112
Tabela 20 - Resultado da sensibilidade de cada parâmetro seguido da variação utilizada.....	113
Tabela 21 - Resultado da sensibilidade de cada parâmetro seguido da variação utilizada.....	115
Tabela 22 - Resultado da sensibilidade de cada parâmetro seguido da variação utilizada.....	116
Tabela 23 – Valores de f (fração do volume de água remanecente no reservatório) e de $\delta^{18}O$ para o começo das coletas.	130
Tabela 24 - Relação dos açudes e seus respectivos valores médios de z, taxa de rebaixamento e taxa de lâmina evaporada.....	132

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1.	Pequenos reservatórios no semiárido, balanço hídrico e traçadores .	17
1.2.	Teoria isotópica	18
1.3.	Questionamento e problemática.	20
1.4.	Objetivos	21
2.	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO	23
2.1.	Bacia do Banabuiú	23
2.1.1.	Clima e vegetação	24
2.1.2.	Geologia e solos	24
2.1.3.	RECURSOS HÍDRICOS	25
2.2.	Sub-bacias hidrográficas dos reservatórios em estudo	26
2.2.1.	Sub-bacia hidrográfica do açude da lagoa cercada	28
2.2.2.	Sub-bacia hidrográfica do açude do cambito	28
2.2.3.	Sub-bacia hidrográfica do açude do riacho verde	29
2.2.4.	Sub-bacia hidrográfica do açude do algodão	29
2.2.5.	Sub-bacia hidrográfica do açude da vista alegre	29
2.2.6.	Sub-bacia hidrográfica do açude da campina	30
2.2.7.	Sub-bacia hidrográfica do açude do fogareiro	30
2.3.	Açudes	30
3.	METODOLOGIA	33
3.1.	Análise geomorfológica de pequenos e médios reservatórios.....	33
3.2.	Balanço hídrico e caracterização isotópica para avaliação da evaporação	35
3.3.	Técnicas heurísticas de otimização	40
3.3.1.	Método de nelder e mead (nelder-mead).....	40
3.3.2.	Método da simulação de emparelhamento (simulated annealing)	42
3.3.3.	Método da evolução diferencial (differential evolution)	43
3.3.4.	Método da busca aleatória (random search)	44
3.4.	Dispositivos experimentais e levantamento de dados	45
3.4.1.	Pluviometria.....	46
3.4.2.	Variáveis metereológicas	47

3.4.3.	Geometria dos açudes	48
3.4.4.	Monitoramento de nível	49
3.4.5.	Batimetria.....	50
3.5.	Montagem das curvas cota x área x volume (cav)	52
3.6.	Amostragem isotópica	53
3.7.	Processo de otimização dos parâmetros geomorfológicos.....	54
3.8.	Análise de sensibilidade	57
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1.	Batimetria dos açudes	60
4.2.	Curvas cota x área x volume (CAV)	60
4.2.1.	Açude do Cambito.....	60
4.2.2.	Açude do Riacho Verde	62
4.2.3.	Açude da Lagoa Cercada	64
4.2.4.	Açude da Vista Alegre	67
4.2.5.	Açude da Campina	69
4.2.6.	Açude do Algodão.....	71
4.2.7.	Açude do Fogareiro	72
4.2.8.	Comparação entre os açudes.....	73
4.3.	Modelagem da geometria dos açudes	74
4.3.1.	Otimização dos parâmetros geomorfológicos e análise de seus perfís transversais	74
4.3.1.1.	Açude do Cambito.....	75
4.3.1.2.	Açude do Riacho Verde	81
4.3.1.3.	Açude da Lagoa Cercada.....	85
4.3.1.4.	Açude da Vista Alegre.....	89
4.3.1.5.	Açude da Campina	93
4.3.1.6.	Açude do Algodão.....	97
4.3.1.7.	Açude Fogareiro	99
4.3.1.8.	Comparação dos açudes	102
4.3.2.	Análise de sensibilidade.....	108
4.3.2.1.	Açude do Cambito.....	108
4.3.2.2.	Açude do Riacho Verde	110
4.3.2.3.	Açude da Lagoa Cercada.....	111

4.3.2.4.	Açude da Vista Alegre.....	112
4.3.2.5.	Açude da Campina	113
4.3.2.6.	Açude do Algodão.....	114
4.3.2.7.	Açude Fogareiro	116
4.3.2.8.	Comparação dos açudes	117
4.3.3.	Rebaixamento do nível dos reservatórios.....	119
4.3.3.1.	Açude do Cambito.....	119
4.3.3.2.	Açude do Riacho Verde	120
4.3.3.3.	Açude da Lagoa Cercada.....	122
4.3.3.4.	Açude da Vista Alegre.....	123
4.3.3.5.	Açude da Campina	125
4.3.3.6.	Açude do Algodão.....	126
4.3.3.7.	Açude Fogareiro	127
4.4.	Balanço hídrico e caracterização isotópica.....	129
5.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	136
6.	REFERÊNCIAS.....	139

1 INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO

1.1. Pequenos reservatórios no semiárido, balanço hídrico e traçadores

Os pequenos açudes no semiárido cearense ainda correspondem ao principal recurso hídrico do pequeno agricultor. É dele que as famílias nordestinas retiram o sustento, seja por meio da pesca, da dessedentação de seus animais ou pelo cultivo de vazantes. As águas desses pequenos reservatórios também são utilizadas para a lavagem de louças, banho e até mesmo para beber.

A principal diferença entre os pequenos e grandes reservatórios está na sustentabilidade/eficiência (CAMPOS et al., 2003). Pequenos reservatórios são fortemente afetados pelo processo de evaporação devido a sua pequena profundidade o que os torna suscetíveis ao esvaziamento em períodos de seca prolongada. A falta de monitoramento desses pequenos reservatórios, por parte do poder público, também demonstra a fragilidade desse recurso.

O uso de ferramentas isotópicas e geoquímicas para o estudo do balanço hídrico e de balanço de massa de açudes é um grande avanço para o entendimento de como esses corpos hídricos se comportam de forma individualizada.

O cálculo do balanço hídrico de um açude é algo relativamente simples, porém, devido aos métodos que dispõem-se atualmente, sejam diretos ou indiretos, muitos erros são incluídos nesse cálculo. O cálculo da evaporação de um açude é uma das maiores fontes de erro, já que os métodos indiretos que existem dispõem de estações meteorológicas espaçadas de forma pouco densa e, muitas vezes, não retratam de forma eficiente a realidade climática a qual cada corpo hídrico está sujeito. Já os métodos diretos, como o tanque classe A, muitas vezes incorrem em erro, já que suas paredes metálicas não conseguem representar bem a realidade geomorfológica do reservatório.

O método isotópico para o cálculo da evaporação é um método direto de cálculo, uma vez que utiliza análise da água do próprio açude para o cálculo da lâmina evaporada. Existem muitas metodologias envolvendo isótopos para o cálculo

da evaporação. Muitos desses métodos utilizam dados de estações meteorológicas enquanto outros utilizam tanques classe A para o cálculo da lâmina evaporada. Essas metodologias devem atribuir erros ao método isotópico, já que nem sempre é possível dispor de uma estação meteorológica na beira do açude ou um tanque classe A dentro do mesmo. Todavia, o método isotópico supera esses erros devido a alta precisão das análises isotópicas das águas de cada corpo hídrico. Portanto, mesmo utilizando dados climáticos gerais, o método individualiza o corpo hídrico por meio da assinatura isotópica da água do próprio açude.

A ferramenta isotópica vem sendo usada de forma cada vez mais intensa em todo o globo e estudos que versam sobre esse tema ganham cada vez mais espaço (GIBSON, J. J., 2001; VANDENSCHRICK et al., 2002; HUNT et al., 2005; TURNER, J. V.; TOWNLEY, 2006; FEKETE et al., 2006; YI et al., 2008; KATTAN, 2008; LONGINELLI et al., 2008; STICHLER et al., 2008; JONSSON et al., 2009; BROCK et al., 2009; JONES; IMBERS, 2010; TURNER, K. W. et al., 2010).

O maior alvo dos estudos isotópicos são as águas subterrâneas (TURNER, J. V.; TOWNLEY, 2006). Uma vez que os métodos convencionais de monitoramento desses recursos hídricos são caros, os isótopos conseguem, com um pequeno custo, mostrar resultados precisos graças as suas características de traçadores e de “CLOCKS”.

Para o semiárido cearense, conhecer a quantidade de água que evapora de um açude é algo deveras importante. Uma vez que uma política de gestão de recursos hídricos deve se basear na disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica, tanto em escala espacial quanto em escala temporal. Além disso, conhecer o percentual evaporado possibilita conhecer o percentual que infiltra pela parede do açude e vai alimentar o lençol freático.

1.2. Teoria isotópica

Isótopos são elementos químicos de mesmo número atômico. Na natureza encontram-se dois tipos de isótopos, os instáveis e os estáveis os instáveis, por exemplo, o carbono-14, servem para datação de fósseis e páleo-águas. Eles emitem

radiação ou partículas e decaem em elementos estáveis. Devido ao seu poder de datação são chamados de “CLOCKS”. Os isótopos estáveis não emitem radiação e se encontram em proporções definidas na natureza são bastante usados na Hidrologia e Climatologia. Na Hidrologia, são usados para o cálculo da evaporação e para explicar a dinâmica dos reservatórios ao redor do mundo (JONES; IMBERS, 2010). Na Climatologia, são utilizados os isótopos acumulados nos sedimentos depositados em fundo de lagos para entender o clima em tempos remotos. Devido seu poder de traçar o comportamento do clima e dos recursos hídricos, os isótopos estáveis realizam papel de traçadores nessas ciências, os mais utilizados em Hidrologia são o oxigênio-18 e o deutério, isótopo do hidrogênio.

O cálculo da quantidade exata de um determinado isótopo estável em uma dada quantidade de água não é uma tarefa fácil de ser realizada. Por isso, quando tratamos de isótopos estáveis não trabalhamos com suas quantidades exatas na amostra, mas sim com um desvio relativo da razão isotópica em relação a uma amostra padrão retirada de um ponto específico do oceano, o VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water). A razão isotópica é dada pela divisão entre a concentração do isótopo raro e a concentração do mais abundante daquele elemento e é, geralmente, representado pela letra R seguido da sigla do isótopo, $^{18}\text{R}[\text{O}_2]$ (trata-se da razão isotópica entre o oxigênio-18 e o oxigênio-16 em uma gás oxigênio). Para calcular o desvio relativo em relação ao padrão divide-se a razão isotópica da amostra pela razão isotópica padrão e subtrai-se de um **equação 1**. Os valores desse desvio relativo são dados em por mil (‰).

$$\delta(\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{amostra}}}{R_{\text{padrão}}} - 1 \right) \times 10^3 \quad (1)$$

Valores negativos do desvio significam que a amostra está mais empobrecida de um certo isótopo em relação ao padrão, já valores positivos do desvio significam que a amostra está mais enriquecida de um certo isótopo em relação a padrão.

Graças a essa possibilidade de perceber enriquecimento ou empobrecimento isotópico é possível identificar se a água de um reservatório sofreu ou não

evaporação. Quando um reservatório sofre evaporação ele fica enriquecido de isótopos pesados, uma vez que os isótopos leves da molécula de água são os primeiros a evaporarem deixando a água enriquecida nos mais pesados. Devido a essa diferença de peso entre os isótopos de um elemento é possível que existam problemas de estratificação isotópica em reservatórios. Em grandes lagos, os efeitos da estratificação não são sentidos de forma tão intensa quanto são sentidos em pequenos lagos (MORTIMER, 1979). Para resolver problemas de estratificação em pequenos lagos é necessário um modelo que considere o reservatório dividido em reservatórios menores com características isotópicas diferentes (LEWIS, 1979). O problema da estratificação ocorre principalmente em períodos chuvosos (MORTIMER, 1979). Durante períodos de pouca chuva a estratificação é destruída devido à ação dos ventos que misturam a água do reservatório.

1.3. Questionamento e problemática.

Os pequenos reservatórios carecem de uma densa rede de monitoramento; a inexistência dessa densa rede ganha força no baixo contingente de pessoas devotadas a esse problema no poder público. Encontrar métodos que juntem eficiência e praticidade no monitoramento de pequenos e médios reservatórios é uma das soluções para contornar esse problema (SHOURIAN et al., 2007).

Monitorar um pequeno reservatório significa conhecer variáveis tais como volume armazenado, área da bacia hidráulica, profundidade, lâmina precipitada, lâmina evaporada, vazão infiltrada e saídas por bombeamento; essas variáveis reunidas resumem a realidade da dinâmica do açude.

Dentre as variáveis que caracterizam a dinâmica do reservatório, a que possui maior grau de incerteza é a lâmina evaporada.

Os principais métodos utilizados para o cálculo da evaporação são métodos indiretos (ROSENBERRY et al., 2007) necessitam de monitoramento meteorológico continuado. O conhecimento da real lâmina evaporada é fator primordial para um bom gerenciamento de um recurso hídrico, pois o quanto de água, de fato, é perdida por evaporação passa pelo conhecimento da realidade físico-climática e geomorfológica do reservatório, o que implica na necessidade de métodos diretos de medida.

A evaporação é a variável que merece maior destaque dentre as que compõem a equação do balanço hídrico. Isso se dá devido à grande generalização que se faz dessa variável durante o monitoramento. As metodologias mais usadas atacam diretamente a individualidade do reservatório, supondo que todos os reservatórios evaporam da mesma forma, mesmo estando sob condições geomorfológicas diferentes. Isso leva a luz às seguintes questões: os reservatórios evaporam da mesma forma? Qual a influência das suas condições geomorfológicas sobre o processo de evaporação? É possível atribuir classes aos reservatórios segundo suas formas de evaporar?

1.4. Objetivos

O objetivo geral desse estudo é responder a uma questão científica e realizar o levantamento de dados inéditos para uma série de pequenos açudes localizados na região de Quixeramobim-CE. A questão científica é: o quanto de fato os pequenos reservatórios do semiárido cearense perdem de água por evaporação e qual a influência de suas condições geomorfológicas sobre o processo.

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Quantificar a lâmina evaporada de sete reservatórios localizados na bacia do Banabuiú-CE, município de Quixeramobim.
- Verificar a eficiência da metodologia isotópica para a quantificação da lamina evaporada para esses açudes.
- Identificar a influência das condições geomorfológicas de um reservatório sobre a lâmina evaporada.
- Realizar uma análise morfométrica detalhada de cada reservatório.

2 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO

2. DESCRIÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO

2.1. Bacia do Banabuiú

A bacia do rio Banabuiú possui uma área de drenagem de 19.810 km², que corresponde a 17,37% do território cearense, tendo como principal rio o Jaguaribe. Essa bacia engloba 12 municípios, apresenta uma capacidade de acumulação máxima de 2.755.909.000 de m³, possuindo 18 açudes públicos gerenciados pela COGERH (Companhia de Gestão de Recursos Hídricos). O principal contribuinte é o rio Banabuiú que percorre um curso total de 314 km até desaguar no rio Jaguaribe, **Figura 1.**

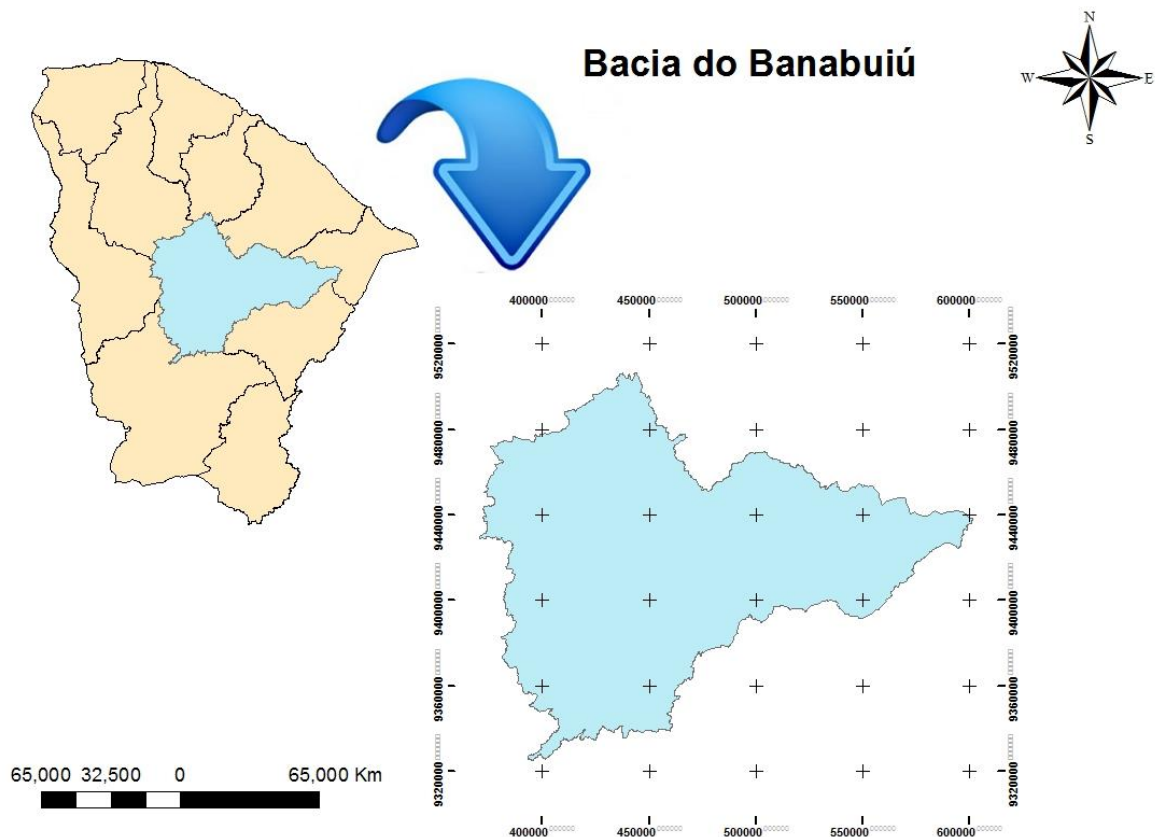


Figura 1 – Bacia do Banabuiú.

2.1.1. Clima e vegetação

O clima da bacia é do tipo Tropical Quente Semiárido com temperaturas médias anuais em torno de 26 °C a 28°C. A média pluviométrica anual da bacia é de 725,4 mm, enquanto a média anual da lâmina evaporada fica em torno de 2000 mm, (SANTANA, 2009).

A vegetação nativa desta região, a caatinga primária, é de tipo floresta seca, caducifolia durante a estação seca; desapareceu quase inteiramente devido as práticas agrícolas de desmatamento para culturas de sequeiro. A vegetação atual é uma caatinga degradada arbustiva com um estrato arbóreo-arbustivo de 5-8 m de altura, (BURTE, 2008). Também é possível observar ao longo da bacia uma certa frequência de cactáceas.

2.1.2. Geologia e solos

A bacia apresenta um padrão geológico bem simples. O embasamento cristalino predominante é de rochas cristalinas (96,53%), representadas por gnaisses e migmatitos diversos, associados a rochas plutônicas e metaplutônicas de composição predominantemente granítica, Pré-Cambriano. Abaixo desse substrato encontram-se sedimentos (3,47%) terciários do Grupo Barreiras, coberturas terciário-quadernárias, que afloram sob a forma de manchas esparsas, ao longo da região, bem como coberturas aluviais, de idade quadernária, localizadas ao longo dos cursos d'água, (SANTANA, 2009), **Figura 2**.

Os solos de maior ocorrência na bacia são os Neossolos Litólicos, Planossolos e Vertissolos nos sedimentos Cenozóicos do período Quadernário e nos Aluviões do rio Banabuiú, (SANTANA, 2009), **Figura 2**.

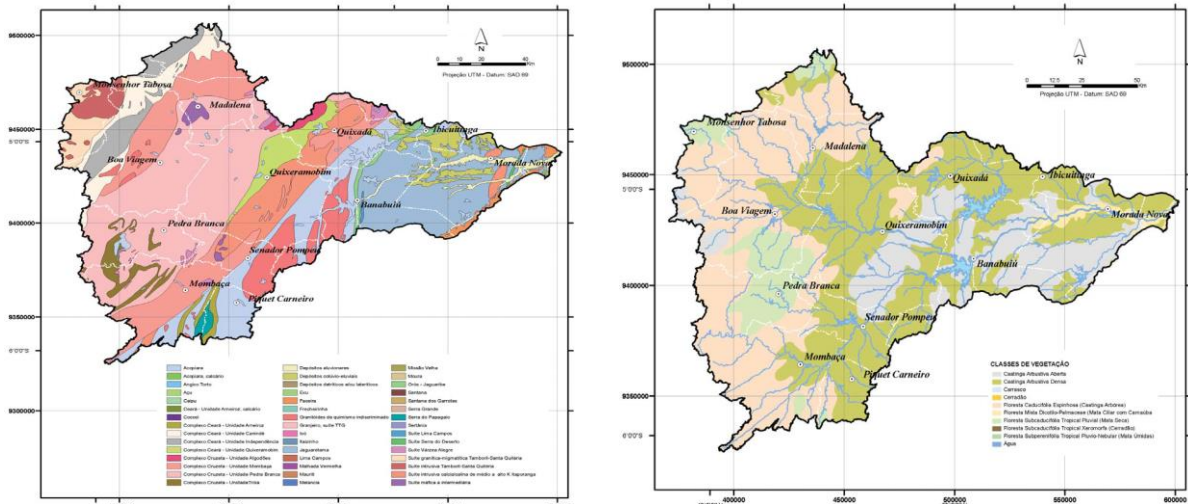


Figura 2 – Geologia e mancha de solos da bacia do Banabuiú. Fonte:(SANTANA, 2009)

2.1.3. RECURSOS HÍDRICOS

A bacia do Banabuiú é caracterizada pela sua escassez pluviométrica a oeste, que diminui a leste à medida que a bacia se aproxima do mar.

A bacia possui um alto nível de açudagem com um total de 5.825 reservatórios, tendo 1.415 com área superior a 5 ha. Dentre os açudes destaca-se o açude do Banabuiú que acumula cerca de 50% do volume de acumulação da bacia que conta com 14 açudes estratégicos que são diariamente monitorados pela COGERH, Figura 3.

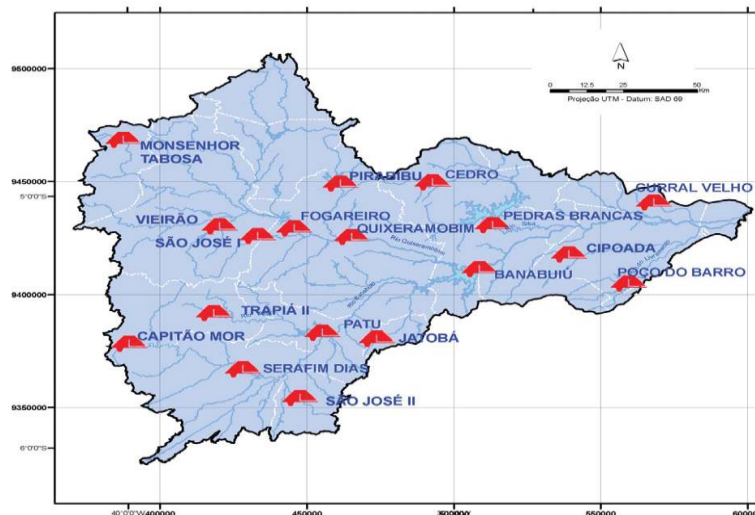


Figura 3 – Açudes monitorados pela COGERH na bacia do Banabuiú (grande área).
Fonte:(SANTANA, 2009)

2.2. Sub-bacias hidrográficas dos reservatórios em estudo

Apesar da grande área de estudo ser a bacia do Banabuiú o trabalho concentra-se primordialmente em uma de suas sub-bacias, a do Riacho da Forquilha, **Figura 4**. Nesta sub-bacia se encontra a maior parte dos reservatórios estudados: Lagoa Cercada, Riacho Verde, Cambito, Algodão e Campina. Somente dois reservatórios se encontram fora da sub-bacia do Forquilha: Vista Alegre e Fogareiro por isso, o trabalho pouco se deterá ao estudo da bacia do Banabuiú, mas sim as pequenas sub-bacias que integram a sub-bacia do Forquilha.

Essa bacia foi adotada para o estudo devido a uma série de fatores:

- Segundo BURTE (2008), ela possui um quadro geomorfológico representativo da região, incluindo em seus domínios um aquífero aluvial sob exploração com características típicas dos encontrados ao longo de toda a região semiárida.
- O trabalho é custeado pela FUNCEME e esse órgão tem a bacia do Riacho da Forquilha como um de seus principais campos experimentais.
- Pelo extenso trabalho de balanço hídrico realizado por BURTE (2008) em sua tese de doutoramento que foi responsável pelo levantamento de uma série de dados muito importantes para a caracterização do meio subterrâneo da bacia.

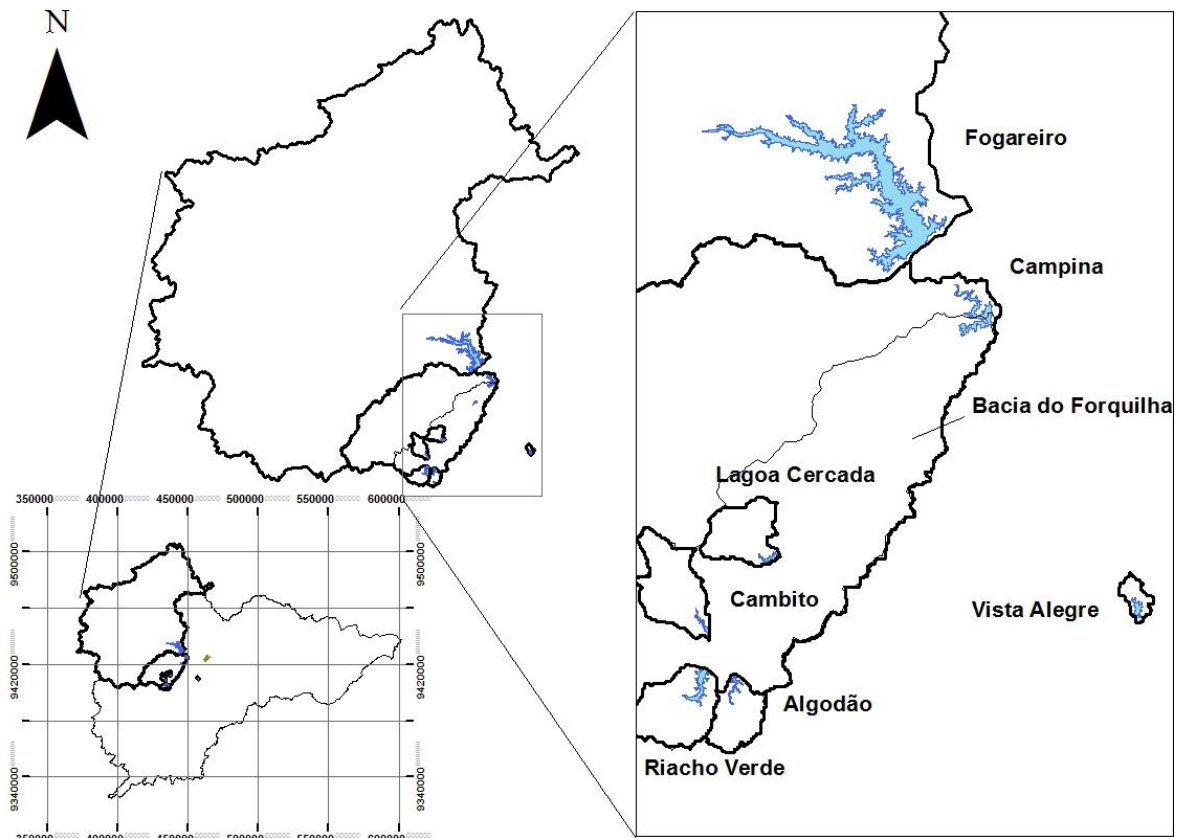


Figura 4 - Área de estudo. Bacia do Riacho da Forquilha e reservatórios estudados.

A bacia do Riacho da Forquilha tem uma área de drenagem de 221 km², com cotas que variam de 684 a 220 m, declividade média de 9,2% e máxima de 90%.

Em termos de recursos hídricos, a bacia conta com mais de 70 reservatórios superficiais; a maioria seca durante a estação seca, BURTE (2008).

A bacia tem clima semiárido, com média de precipitação de 706 mm, vegetação do tipo caatinga arbustiva fortemente degradada em decorrência da prática de queimadas para o preparo das áreas de plantio de sequeiro (BURTE, 2008). As regiões com vegetação preservada se encontram nas cabeceiras mais íngremes da bacia.

O solo da bacia, com exceção das áreas de aluvião, são rasos (50 cm a 100 cm), apresentando capacidade de retenção de água bem limitada. O tipo de escoamento predominante é do tipo hortoniano. Os principais tipos de solo encontrados na bacia são os bruno não cálcicos, vertossolos, planossolos e solos hidromórficos.

Os depósitos aluviais correspondem a cerca de 2,7% da área da bacia hidrográfica. Existem 17 comunidades devidamente organizadas dentro da bacia cada uma com cerca de 20 a 130 famílias, e média de 4,1 pessoas por família (BURTE, 2008).

2.2.1. Sub-bacia hidrográfica do açude da lagoa cercada

A bacia do açude da Lagoa Cercada tem área de 10,7 km² e se localiza no centro da bacia do riacho da Forquilha (**Figura 4**) e possui 6 classes de solo, predominando o argissolo vermelho-amarelo e o luvisolo crômico. Essas duas classes de solos juntas são responsáveis por mais de 50 % do solo da bacia.

Para representação geométrica da bacia podemos usar dois parâmetros, o coeficiente de forma (K_f) e o coeficiente de compactidade (K_c). O primeiro é obtido pela relação entre a área da bacia e o quadrado do comprimento do trecho de rio mais longo, e o segundo é dado pela relação entre o perímetro da bacia e sua área. Os valores encontrados para K_f e K_c foram, respectivamente, 0,49 e 1,56.

A bacia possui uma declividade máxima de 39,9% e média de 6,6 %. O terreno é uniforme, estando esse pico situado em um divisor de águas da bacia e concentrado em um único ponto.

2.2.2. Sub-bacia hidrográfica do açude do cambito

A bacia hidrográfica do açude do Cambito tem área de 14,2 km², localiza-se cerca de 5 km de distância da jusante da bacia do açude da Lagoa Cercada (**Figura 4**) e tem como classe principal de solos os neossolos litólicos.

Os valores encontrados para K_f e K_c foram, respectivamente, 0,42 e 1,78. A bacia possui uma declividade máxima de 69,7 % e média de 19,8%. A bacia tem picos elevados em toda sua extensão, o que gera rápidos deflúvios para a rede de drenagem.

2.2.3. Sub-bacia hidrográfica do açude do riacho verde

A bacia hidrográfica do açude do Riacho Verde tem uma área de 16,1 km² e localiza-se na parte mais a montante da bacia do riacho da Forquilha (**Figura 4**). Está situado, em um dos principais braços do riacho da Forquilha e possui como principais classes de solos os neossólos flúvicos e litólicos.

Os valores encontrados para K_f e K_c foram, respectivamente, 0,27 e 1,63. A declividade da bacia é distribuída de tal forma que há grande declividade e locais predominantemente planos, com declividade máxima de 54% e uma declividade média de 9,36 %.

2.2.4. Sub-bacia hidrográfica do açude do algodão

A bacia hidrográfica do açude do Algodão tem uma área de 8,41 km² e localiza-se nas cabeceiras da bacia do Riacho da Forquilha, **Figura 4**. Os neossolos litólicos são dominantes na bacia.

Os valores encontrados para K_f e K_c foram, respectivamente, 0,73 e 1,60. A bacia possui pontos de estreitamento nas cabeceiras do açude maior, com redes de drenagem muito estreitas. A bacia possui uma declividade máxima de 41,1% e uma declividade média de 7,90 %.

2.2.5. Sub-bacia hidrográfica do açude da vista alegre

A bacia hidrográfica do açude da Vista Alegre tem uma área de 2,50 km² e localiza-se fora da bacia do Riacho da Forquilha (**Figura 4**). A classe de solo dominante na região é dos luvisolos crômicos.

Os valores encontrados para K_f e K_c foram, respectivamente, 0,57 e 1,70. A topografia da bacia é do tipo plana com uma declividade média de 3,93%, com dois pontos de declividade extrema esses pontos são dois monólitos situados próximo ao sangradouro do principal reservatório é nesses pontos que se encontra a declividade máxima da bacia, que é de 30,35%.

2.2.6. Sub-bacia hidrográfica do açude da campina

A bacia hidrográfica do açude da Campina tem área de 559,41 km² e localiza-se a montante da bacia do Riacho da Forquilha (**Figura 4**). Os neossolos litólicos são dominantes na bacia.

Os valores encontrados para K_f e K_c foram, respectivamente, 0,78 e 1,20. A bacia possui uma declividade máxima de 81,1% e uma declividade média de 13,5 %.

2.2.7. Sub-bacia hidrográfica do açude do fogareiro

A bacia hidrográfica do açude da Vista Alegre tem área de 5106,47 km² e localiza-se fora da bacia do Riacho da Forquilha, **Figura 4**. A classe de solos dominantes na região são os luvisolos crômicos.

Os valores encontrados para K_f e K_c foram, respectivamente, 0,68 e 1,50. A bacia possui uma declividade máxima de 90 % e uma declividade média de 25,2 %.

2.3. Açudes

São sete os açudes estudados nesse trabalho , todos localizados na bacia hidrográfica do Banabuiú, na porção que pertence ao município de Quixeramobim-CE, **Figura 4**. Os nomes dos açudes correspondem aos nomes dados às bacias nesses estudo; oriundos das comunidades da região que possuem esses açudes como a principal fonte de recurso hídrico.

Os açudes escolhidos para esse estudo são considerados de pequeno à médio porte, com exceção do Fogareiro que possui mais de 100 milhões de metros cúbicos de capacidade e portanto, é considerado um açude de grande porte (**Tabela 1**). Esse açude foi escolhido para fins de comparação. Logo, não é o foco do estudo. Os nomes dos açudes estudados, em ordem crescente de capacidade são: Cambito, Lagoa Cercada, Vista Alegre, Algodão, Riacho Verde, campina e Fogareiro.

Tabela 1 – Relação dos açudes monitorados durante o estudo seguidos de suas variáveis geométricas: Hmax (profundidade máxima), Smax (espelho d'água máximo) e Vmax (volume de água máximo).

Açude	Hmax (m)	Smax (m²)	Vmax (m³)
Fogareiro	31,20	1,85E+07	1,19E+08
Campina	11,36	1,19E+06	4,03E+06
Riacho Verde	16,03	8,80E+05	5,63E+06
Algodão	14,00	3,20E+05	1,98E+06
Vista Alegre	8,98	2,95E+05	8,33E+05
Loagoa Cercada	6,67	2,53E+05	6,55E+05
Cambito	9,15	1,94E+05	6,26E+05

Quanto a localização, os açudes se concentram em torno da bacia do Riacho da Forquilha. Nem todos são tributários nessa bacia, parte está dentro da bacia e parte nas suas proximidades. Os reservatórios que se encontram dentro da bacia do Riacho da Forquilha são: Cambito, Lagoa Cercada, Riacho Verde, Algodão e Campina. Os açudes da Vista Alegre e Fogareiro se encontram fora da sub-bacia do Forquilha.

Esses açudes tem como principal função a dessedentação de animais, a pesca e o uso doméstico, suas águas não são usadas para beber, salvo pelas famílias mais carentes. Existe uma média de uma a duas caixas d'água por açude. Apesar de não ser prática comum das comunidades, é possível ver em alguns reservatórios as águas sendo usadas para irrigação de pequenas culturas ou para o cultivo de vazantes (**Figura 5**).



Figura 5 – Cultivos de vazante no açude da Lagoa Cercada.

3 METODOLOGIA

3. METODOLOGIA

3.1. Análise geomorfológica de pequenos e médios reservatórios

A análise geomorfológica dos açudes se baseia no estudo da geomorfologia do terreno da região onde está contido, bem como no estudo de sua morfometria que leva em consideração suas características geométricas portanto, para estudar tais características é necessário adotar um modelo geométrico que represente o reservatório estudado. O modelo adotado nesse estudo é o proposto por MOLLE(1994).

O trabalho de análise da geometria dos reservatórios é totalmente baseado na teoria elaborada por MOLLE (1994) em seu livro GEOMETRIA DOS PEQUENOS AÇUDES como parâmetros para caracterização da geometria de cada açude são utilizados o coeficiente de forma (α) e o coeficiente de abertura (K).

Segundo MOLLE (1994), o coeficiente K está relacionado a abertura geral do cone do reservatório, ou seja, quanto mais aberto o reservatório e menos inclinado o vale que o barra, maior será esse coeficiente. Então, o autor sugere que açudes de grande porte situados em vales aluviais largos e abertos tenham valores de K elevados. Enquanto que para vales fechados, com relevos mais acentuados, deve-se encontrar valores de K mais baixos. A idealização geométrica desse parâmetro é mostrado na **Figura 6**.

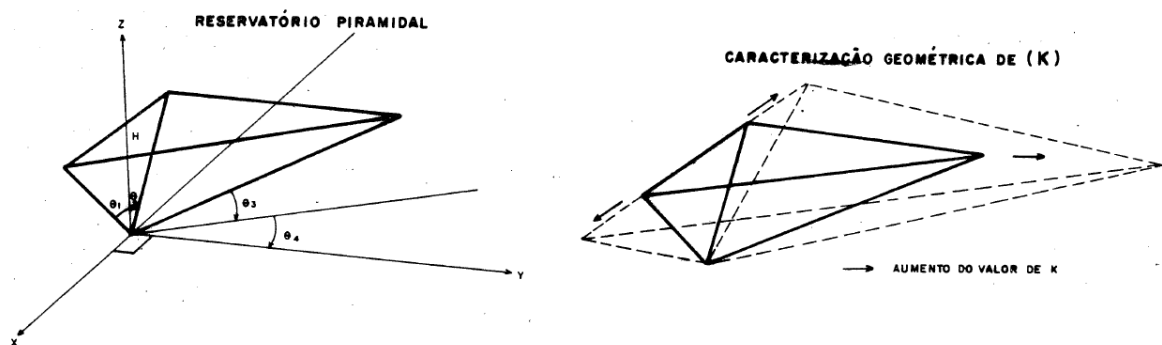


Figura 6 – Representação geométrica piramidal de um reservatório.

Fonte:(MOLLE, 1994)

O parâmetro K pode ser expresso em função dos ângulos de encosta dos açudes, ou seja, $K = \cotg\theta_3 \cdot \cos\theta_4 \cdot [tg\theta_1 + tg\theta_2]$. Logo, pode-se perceber que quando θ_1 e θ_2 aumentam e quando θ_3 tende a zero, K aumenta. Isso é natural de uma forma geométrica mais aberta. A faixa de valor admitida para K é de 200 à 10000, **Tabela 2.**

Tabela 2 – Valores de referência para o parâmetro K.
Fonte: (MOLLE; CADIER, 1992)

Caracterização	Vales encaixados Relevo muito acidentado	Vales regulares Relevo ondulado médio	Vales abertos e planos. Relevo pouco marcado.
Valor de (K)	200 – 1000	800 – 3000	2000 - 10000

O parâmetro α possui uma relação direta com a concavidade das encostas. Os valores de α vão de 2,2 à 3,4. Os menores valores de α estão relacionados a encostas côncavas, enquanto que seus maiores valores são atribuídos a encostas convexas (**Tabela 3**).

Tabela 3 – Valores de referência para o parâmetro α .
Fonte: (MOLLE; CADIER, 1992)

Caracterização (Perfil do vale)	Encostas côncavas	Vale em V	Encostas convexas
Valor de (α)	2,20 – 2,80	2,70 – 3,20	3,00 – 3,40

Os valores regionais dos parâmetros α e K são, respectivamente, 2,7 e 1500, (MOLLE; CADIER, 1992).

O procedimento de busca dos valores de α e K que melhor representam a geometria do reservatório passa por um processo de otimização desses parâmetros.

O processo de otimização foi o de métodos heurísticos de busca feito com mais de um método, por segurança. A importância de usar mais de um método é devido a alta sensibilidade do parâmetro α a erros na medida, possibilitando a avaliação do tipo de método que melhor se encaixa a situação em estudo.

Os dados usados para ajustar os parâmetros ao modelo geométrico de cada reservatório são oriundos de batimetrias realizadas nos açudes cujos dados

permitem a montagem da curva cota x área x volume real do reservatório. A partir da curva real é realizado o ajuste dos parâmetros.

A avaliação da geomorfologia das proximidades dos reservatórios, contou com imagens SRTM de resolução 90m x 90m, foi calculada uma média da declividade da região em um raio de até 400m dos limites dos açudes.

3.2. Balanço hídrico e caracterização isotópica para avaliação da evaporação

Nesse trabalho utilizamos a metodologia proposta por Desconnets *et al.*(1997) para entender o balanço hídrico de reservatórios sujeitos a evaporação no semiárido cearense. Como a precipitação acumulada no período chuvoso de 2012 (fevereiro a maio) foi de apenas 124 mm, bem inferior a média da região que se encontra na faixa de 400 a 1000 mm (BURTE, 2008), consideramos o período de coleta de fevereiro à setembro representativo de um período seco prologando (**Figura 7**). A partir dessa consideração construímos a curva $\delta^{18}\text{O}$ versus f (fração da água remanescente no reservatório) admitindo como dado inicial o primeiro valor de $\delta^{18}\text{O}$ obtido para o período. Que é uma Consideração importante para os cálculos que se seguem.

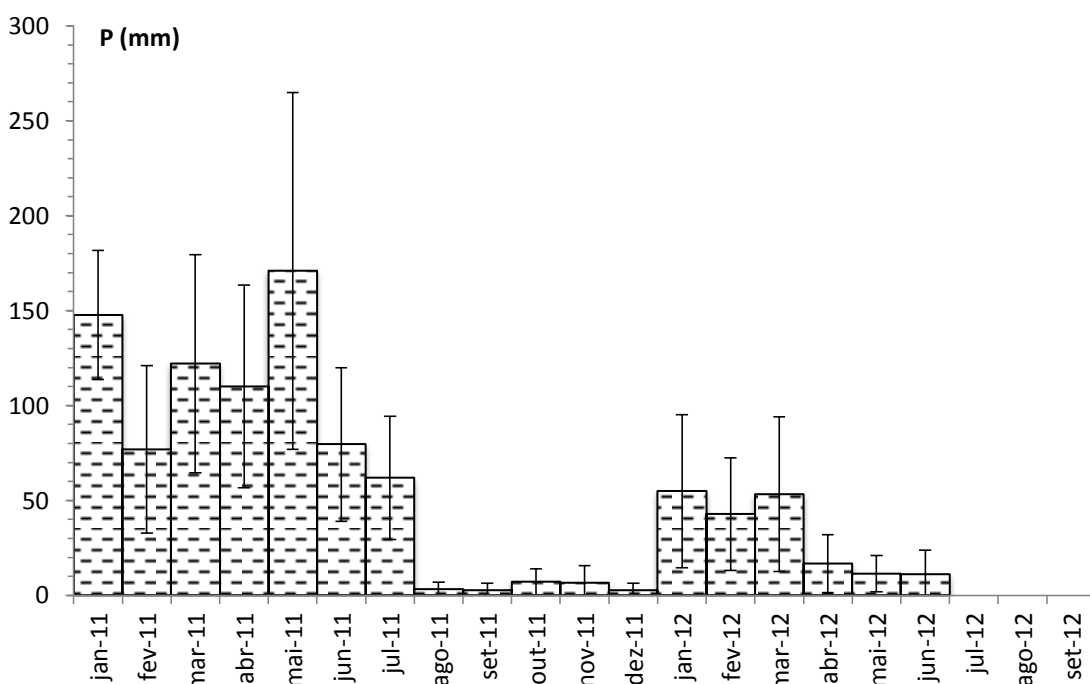


Figura 7 – Média das pluviometrias dos postos da região de Quixeramobim-CE para o período de janeiro de 2011 à setembro de 2012.

O modelo para o cálculo da composição isotópica de um reservatório exposto à evaporação foi proposto por CRAIG & GORDON (1965), tendo como expressão geral:

$$\frac{\partial \delta}{\partial \ln f} = \frac{h_a(\delta - \delta_a) - (\delta + 1)(\Delta\varepsilon + \frac{\varepsilon}{\alpha})}{1 - h_a + \Delta\varepsilon} \quad (2)$$

Onde, δ é o desvio do isótopo mais raro em relação ao padrão VSMOW, δ_a é a composição isotópica do vapor atmosférico, h_a é a umidade relativa média para o período, α é o fracionamento isotópico, ε é o enriquecimento isotópico em estado de equilíbrio vapor/líquido, $\Delta\varepsilon$ é o enriquecimento cinético e f a fração de água remanescente no reservatório.

Integrando a equação (2) para as condições iniciais (δ_1, f_1) e finais (δ_2, f_2) obtém-se uma equação que não se aplica a reservatórios que perdem água também por infiltração/bombeamento. Para incluir o parâmetro infiltração/bombeamento na equação obtida acrescentou-se o termo z multiplicando o expoente B , resultando na equação (3):

$$\delta_2 = \frac{A}{B} + \left(\delta_1 - \frac{A}{B}\right) \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^{Bz} \quad (3)$$

onde, $B = \frac{h_a - \Delta\varepsilon - \varepsilon/\alpha}{1 - h_a + \Delta\varepsilon}$ (3a), $A = \frac{h_a \delta_a + \Delta\varepsilon + \varepsilon/\alpha}{1 - h_a + \Delta\varepsilon}$ (3b), $z = \frac{Q_E}{Q_E + Q_I}$ (3c), Q_E é a vazão de saída devido a evaporação e Q_I a vazão de saída devido ao conjunto infiltração/bombeamento.

O enriquecimento cinético é dado pela equação (4) proposta por GONFIANTINI(1986) e o fracionamento isotópico α pela equação (5) proposta por HORITA e WESOLOWSKI(1994), para valores de temperatura menores que 100 °C.

$$\Delta\varepsilon = 14,2(1 - h_a) \quad (4)$$

$$10^3 \ln \alpha = -7.685 + 6.7123 \left(\frac{10^3}{T}\right) - 1.6664 \left(\frac{10^6}{T^2}\right) + 0.35041 \left(\frac{10^9}{T^3}\right) \quad (5)$$

Na equação (5), T é a temperatura do ar da região estudada, em Kelvin. O fator de enriquecimento para a situação de equilíbrio líquido/vapor é dado por $\varepsilon = \alpha - 1$.

A composição isotópica do vapor d'água da atmosfera pode ser expresso pela diferença entre o δ da chuva e o fator de enriquecimento em equilíbrio, ou seja, $(\delta_i - \varepsilon)$. Porém, o cálculo da composição isotópica do vapor d'água atmosférico por esse método pode trazer às medidas um erro de até $\pm 5 \text{ ‰}$ (GIBSON, J. J. et al., 1999), o que para os valores $\delta^{18}\text{O}$ representa um erro muito elevado. Além disso, estudos relatam que o uso da composição isotópica da água da chuva para encontrar a composição isotópica do vapor atmosférico funciona bem para regiões de clima moderado e de forma pouco satisfatória para regiões semiáridas (ROZANSKI et al., 2001). Isso agravaria ainda mais o erro nas medidas.

O procedimento mais adequado para o cálculo de δ_a , segundo Gibson et al.(1999), seria através do uso de tanque classe A, mas devido a impossibilidade de se mantê-lo de forma segura em campo, não foi possível seguir essa metodologia. Tendo em vista essas dificuldades, optou-se por adotar um intervalo de -12‰ à -10‰ e não um valor único. O primeiro valor do intervalo corresponde ao δ_a obtido com os dados de precipitação para o ano de 2011, e o segundo, corresponde ao valor obtido com os dados de precipitação de 2012. É importante salientar que esse intervalo está fora do valor médio achado por Tremoy et al.(2012) em seu estudo feito em Níger, região muito semelhante à estudada o valor médio encontrado para o período seco foi de -15 ‰ . Apesar de conhecidas as limitações do método utilizado para estimar δ_a , ele foi escolhido por falta de opções aparentes.

O parâmetro z foi ajustado seguindo o mesmo procedimento de DESCONNETS *et al.*(1997), ou seja, minimizando a função erro $E(z)$, dada por:

$$E(z) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta_m^{18}\text{O}(z) - \delta_o^{18}\text{O})^2} \quad (6)$$

onde, $\delta_m^{18}\text{O}(z)$ é o valor estimado para um dado z e $\delta_o^{18}\text{O}$ é o valor medido.

Ajustando o valor de z para o período é possível conhecer o percentual de água perdida por evaporação em relação ao total [evaporação + infiltração + bombeamentos].

As variáveis climáticas umidade relativa do ar e temperatura do ar foram obtidas do sítio eletrônico do INMET(INMET, 2013) e representadas por meio de suas médias mensais. A **Figura 8** mostra o gráfico com os valores de temperatura

média mensal e umidade relativa do ar média mensal para o período que se estende de 01/01/2012 a 30/09/2012. A barra de erros associados aos valores de umidade relativa do ar e temperatura contém como extremos os valores máximos e mínimos das variáveis para o mês. Esses dados são oriundos de uma estação afastada cerca de 35 km do centro da bacia do riacho da Forquilha.

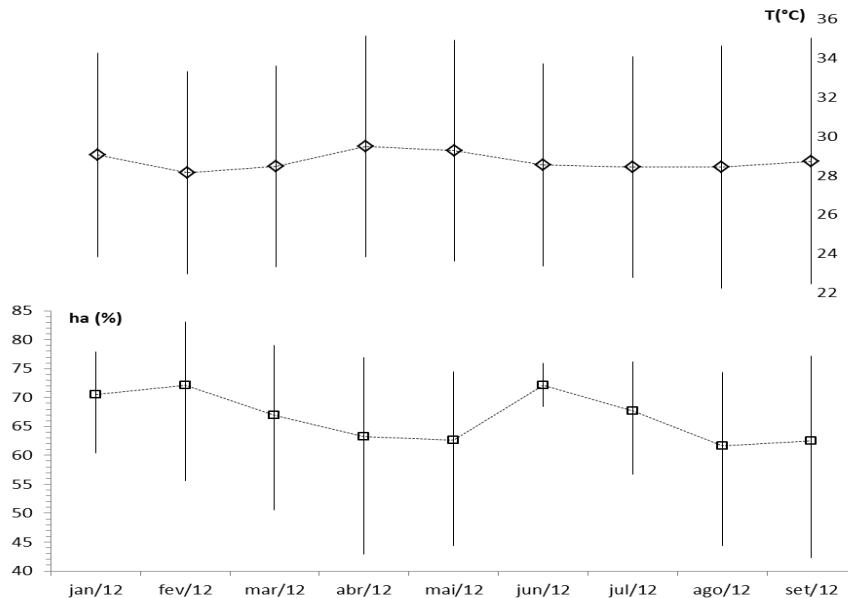


Figura 8 – Valores das médias mensais da umidade relativa do ar (ha) e da temperatura (T) para o período em estudo.

Os dados de umidade relativa do ar mensais sofrem uma fraca variação ao longo do período de estudo, o que justifica o emprego de seus valores médios mensais no cálculo da evaporação pelo método isotópico. O grande intervalo que é mostrado nas barras de erro são devido as variações diurnas e noturnas. O valor médio de umidade relativa do ar obtida para o período é de 66,58 %. Os valores de temperatura do ar, em uma escala mensal, não sofrem grandes variações, possuindo uma média para o período igual a 28,72 °C.

A equação do balanço hídrico, equação (7), foi utilizada para o cálculo da lâmina evaporada. A partir do ajuste do parâmetro z na equação (3) é possível obter a relação entre o percentual de água perdida por evaporação em relação ao que foi perdido pelo conjunto infiltração/bombeamento, ou seja:

$$\frac{dV}{dt} = \dot{V}_I - \dot{V}_O \quad (7)$$

onde, \dot{V}_I corresponde às vazões de entrada e \dot{V}_O às vazões de saída. Considerando que a precipitação não foi suficiente para gerar escoamento na bacia e desprezando as intrusões subterrâneas, é possível considerar como única entrada nos reservatórios as precipitações diretas sobre as bacias hidráulicas de cada reservatório. Logo, segue que:

$$\dot{V}_I \cong \overline{Q_P} = \frac{P \cdot \bar{A}}{\Delta t}$$

$$\dot{V}_O \cong \overline{Q_E} + \overline{Q_I}$$

onde,

$$Q_I = Q_{IN} + Q_B = \left(\frac{1-z}{z}\right) Q_E$$

incluindo esses termos na equação (6), tem-se:

$$\frac{dV}{dt} \cong \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{P \cdot \bar{A}}{\Delta t} - \left(\overline{Q_E} + \left(\frac{1-z}{z}\right) \overline{Q_E}\right)$$

$$\overline{Q_E} = \frac{z}{\Delta t} (P \cdot \bar{A} - \Delta V) \quad (8)$$

onde, P é a lâmina precipitada sobre o reservatório, Q_{IN} é a vazão unicamente pela infiltração, Q_B é a vazão unicamente aos bombeamentos, ΔV é a diferença entre o volume final e o inicial e \bar{A} é a média das áreas para um intervalo de tempo Δt .

O passo de tempo usado é semanal, coincidindo com as coletas e marcações de nível. A equação (8) é usada para o cálculo da vazão de água evaporada. Após a determinação da vazão de água evaporada, é possível estimar para cada reservatório a vazão de água infiltrada, uma vez que são conhecidas as vazões por bombeamento para cada reservatório. A lâmina evaporada é obtida dividindo a vazão da água evaporada pelo tempo e pela média da área para o período. Deve-se lembrar que a equação (2) não prevê um termo para chuva, logo $P \approx 0$. Devido a baixa precipitação que ocorreu no período, é possível realizar essa aproximação sem maiores erros ao resultado.

Os dados de composição isotópica foram obtidos por meio de um espectrômetro de massa que usa um sistema duplo (CO_2 em equilíbrio com água padrão) para ^{18}O , metodologia essa proposta por EPSTEIN & MAYEDA(1953). As

análises foram realizadas por meio de uma parceria entre a Universidade Federal do Ceará (UFC), a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e a Universidade Francesa Montpellier 2. As análises foram feitas no *Laboratoire Mutualisé d'Analyse des isotopes stables de l'eau – LAMA*. A precisão obtida para as medidas foi de $\pm 0,05\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$.

3.3. Técnicas heurísticas de otimização

3.3.1. Método de nelder e mead (nelder-mead)

O método proposto por Nelder e Mead é um método de busca direta; toda sua teoria está associada ao conceito de uma figura geométrica chamada *simplex*, onde um *simplex* é uma figura geométrica que possui um número de vértices igual a o número de dimensões no espaço em que está contido mais um (WALTERS et al., 1991). ele usa seu poliedro de busca (*simplex*) para tentar resolver o problema de adequação do passo na busca do ótimo global.

O algoritmo começa formando um poliedro de dimensões $(D + 1)$, ou um *simplex* de $D + 1$ pontos, x_i , onde $i = 0, 1, 2, \dots, D$. Esses pontos são aleatoriamente distribuídos ao longo da superfície de resposta. Os índices dos pontos são ordenados de acordo com o critério de ascendência do valor da função objetivo, de tal forma que x_0 é o melhor ponto e x_D é o pior ponto. Para obter um “ponto tentativa”, x_r , o pior ponto, x_D , é refletido através da face oposta do poliedro usando um fator de ponderação $F1$, (**Figura 9**); geralmente, $F1$ é maior que zero. A equação 10 mostra a relação entre o vetor refletido, x_r , o vetor com pior grupo de valores, x_D e o vetor centroide, x_m :

$$x_r = x_D + F1(x_m - x_D) \quad (9)$$

onde,

$$x_m = \frac{1}{D} (\sum_{i=0}^{D-1} x_i) \quad (10)$$

se a reflexão através do centroide melhorar o melhor ponto, x_0 , ou seja, se esse novo vetor aplicado a função objetivo conseguir um resultado melhor do que o obtido

quando se aplica x_0 , o algoritmo Nelder-Mead toma outro passo na mesma direção baseado na suposição que o resultado pode ser melhor ainda. Esse novo passo é obtido gerando um novo fator de escala F2, ou seja:

$$x_e = x_r + F2(x_m - x_D) \quad (11)$$

se esta expansão do passo também melhorar o valor de $f(x_0)$, então substitui-se x_D por x_e . esta nova configuração com $D + 1$ pontos torna-se o próximo *simplex*, dando início ao recomeço do processo. Se, porém, x_e não melhorou x_D , então x_r substitui x_D . Se, porém, x_r não melhora x_0 na primeira tentativa, então x_r é comparado ao próximo pior ponto, x_{D1} . Se x_r for melhor que x_{D1} , então x_r melhora x_D . Se, porém, x_r é pior que x_{D1} , utiliza-se uma nova escala F3, contraindo todo o *simplex*.

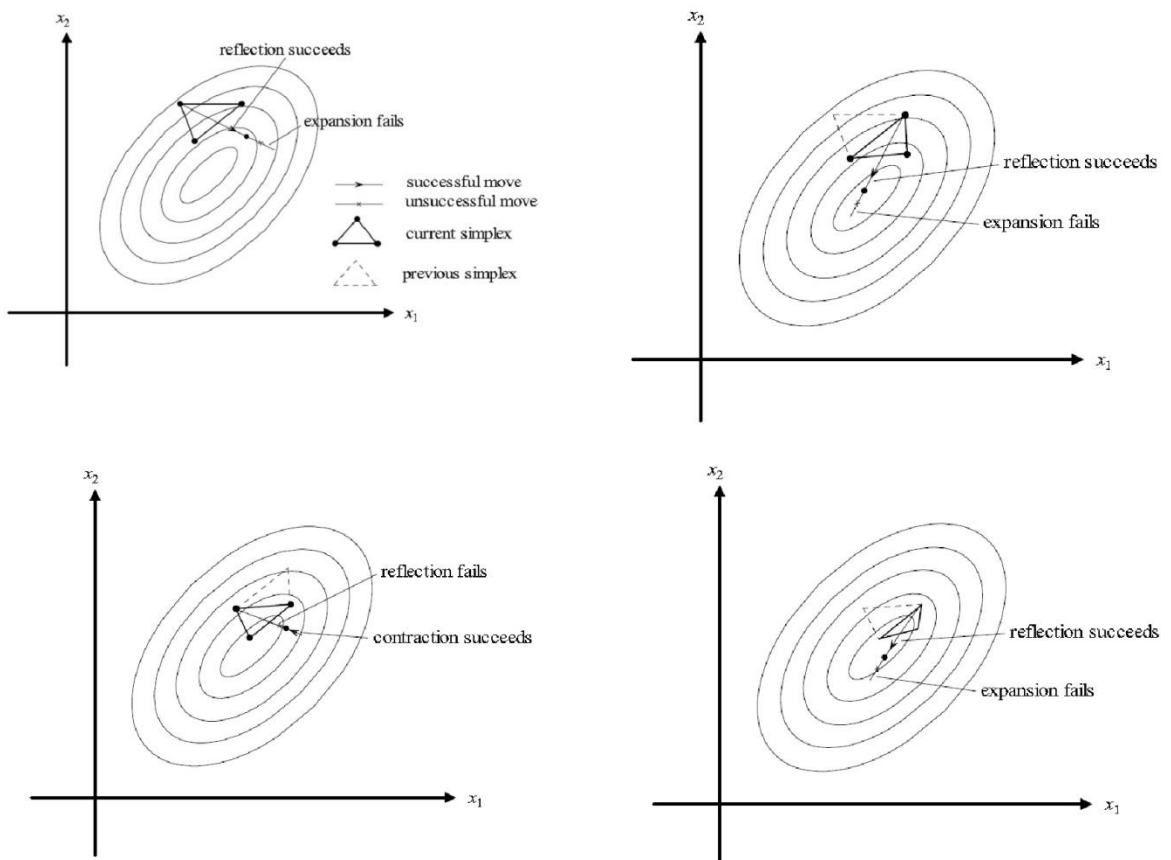


Figura 9 – Desenvolvimento do simplex sobre a superfície de resposta durante uma otimização.
Fonte:(PRICE et al., 2005)

Esse método é um dos mais velhos algoritmos de otimização que dependem fortemente da diferença de vetores para explorar a “paisagem” da superfície de

resposta. Ele pode ser melhorado associando-o a uma busca aleatória controlada, e se caracteriza pelo recomeço de diversos pontos aleatórios da superfície de resposta, evitando a recorrência em mínimos locais.

Na plataforma de desenvolvimento *mathematica*[®] 8.0, a razão de contração usada, *por default*, é 0,5, a razão de expansão é 2,0 e razão de reflexão é 1,0. O critério de parada é alcançado quando a distância entre o antigo ponto e o novo ponto é menor que a precisão estabelecida.

3.3.2. Método da simulação de emparelhamento (simulated annealing)

Esse método é um minimizador por natureza. o termo “annealing” refere-se ao processo de lento resfriamento de uma substância fundida tal que seus átomos possam se emparelhar em uma configuração de energia mínima. Considerando que a substância se mantém próximo do equilíbrio, em uma temperatura T, as energias atômicas E são distribuídas de acordo com a equação de Boltzman:

$$P(E) \sim \exp\left(\frac{E}{kT}\right) \quad (12)$$

onde, k é a constante de Boltzman e P(E) é a probabilidade de se encontrar um átomo na temperatura T com uma energia E.

O algoritmo começa ao se estabelecer de forma aleatória um ponto x_0 e uma temperatura T_0 . O ponto x_0 será, inicialmente, o ponto ótimo da superfície de resposta e através de uma distribuição gaussiana é gerado um desvio no valor do vetor. Se a função objetivo obtida aplicando-se o vetor x_0 for maior do que a função objetivo associada ao vetor x_0 acrescido do desvio, então toma-se essa nova função como a ótima e o vetor x_0 acrescido do desvio como sendo o novo x_0 . Caso contrário calcula-se a diferença “d” entre as duas funções objetivo comparadas e gera-se um número aleatório no intervalo [0,1] através de uma distribuição uniforme. Se esse valor aleatório for menor que o valor obtido pela equação 12 o novo valor de x_0 será o acrescido do desvio, (METROPOLIS et al., 1953) caso contrário, o algoritmo reduz a temperatura por um fator de redução recomeçando o processo. O

critério de convergência adotado foi o de no máximo 50 iterações sem sair do mesmo ponto:

$$r = \exp\left(-\frac{d.b}{T}\right) \quad (13)$$

onde, r corresponde a probabilidade de um valor ser aceito e b é dado por $b = -\frac{d.\text{Log}(i+1)}{10}$, sendo i a iteração que está ocorrendo.

O algoritmo Metrópolis implementa a equação de Boltzman como uma seleção probabilística. Note que a probabilidade de um valor ser aceito diminui a medida que “d” aumenta e que T decresce.

Segundo PRICE (2005) deve-se ter muito cuidado ao se trabalhar com esse algoritmo uma vez que se T diminuir muito rapidamente o algoritmo se comportará como um otimizador local ficando preso na região que começou; porém, se T diminuir lentamente, os cálculos se tornam muito demorados.

3.3.3. Método da evolução diferencial (differential evolution)

O método Differential Evolution é um método de busca global; sua base conceitual repousa sob o conceito de mutação. Essa simples função estocástica é um otimizador que utiliza uma população para atacar o problema do ponto inicial através de uma amostragem da função objetivo em vários pontos iniciais escolhidos aleatoriamente. Parâmetros de controle predefinidos definem o domínio a partir do qual os N_p vetores desta população inicial são escolhidos.

PRICE (2005) descreve esse algoritmo da seguinte forma: cada vetor é indexado com uma numeração que vai de 0 até $N_p - 1$. Assim como outros métodos baseados em população, esse ponto gera novos pontos que são baseados na população de pontos já existentes. A geração desses novos números ocorre na forma de reflexões. Esses novos pontos obtidos passam por um estágio de seleção, onde são “defrontados” com a primeira população gerada obedecendo a ordem de criação, ou seja, o primeiro vetor gerado pela reflexão confronta-se com o vetor de índice zero da primeira população, o segundo gerado por reflexão confronta-se com o vetor de índice um e assim sucessivamente. Quando um membro da primeira

população possui um valor de função objetivo melhor do que o valor da função objetivo do vetor de mesmo índice da nova população, dizemos que esse vetor sobreviveu ao processo de seleção. Após todos os vetores da primeira geração serem confrontados inicia-se um novo processo de seleção com os “melhores” membros da nova e antiga população. A **Figura 10** mostra o desenvolvimento do algoritmo sobre uma superfície de resposta.

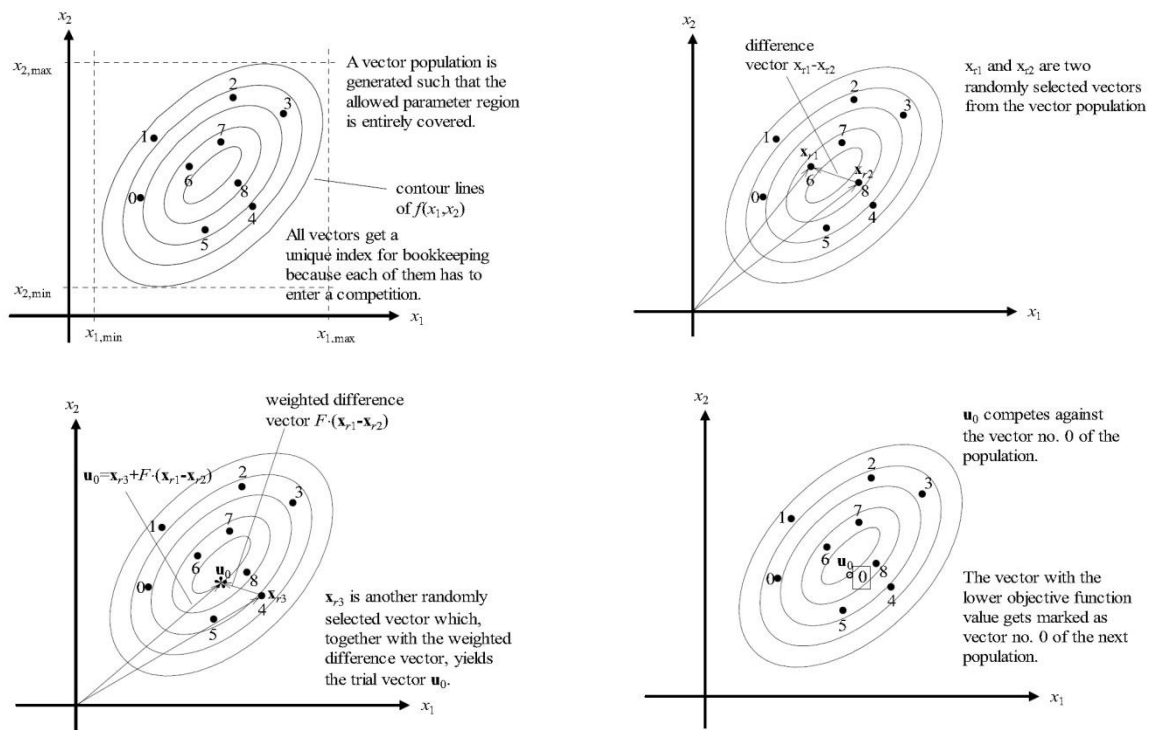


Figura 10 – Distribuição de pontos sobre a superfície de resposta a aplicação do método de otimização Differential Evolution. Fonte: (PRICE et al., 2005)

A plataforma de desenvolvimento mathematica[®] utiliza como critério de escolha para que um determinado vetor seja tomado para confronto uma distribuição probabilística uniforme.

3.3.4. Método da busca aleatória (random search)

O método de busca Random Search emprega, da mesma forma que o método Nelder-Mead, uma figura *simplex* de $D + 1$ pontos distribuídos aleatoriamente a partir de uma população de $N_p > D + 1$ vetores, como mostrado na **Figura 11**. Uma reflexão através do centroide gera um novo ponto x_r ; se esse ponto é melhor que o atual pior ponto x_w , x_r substitui x_w .

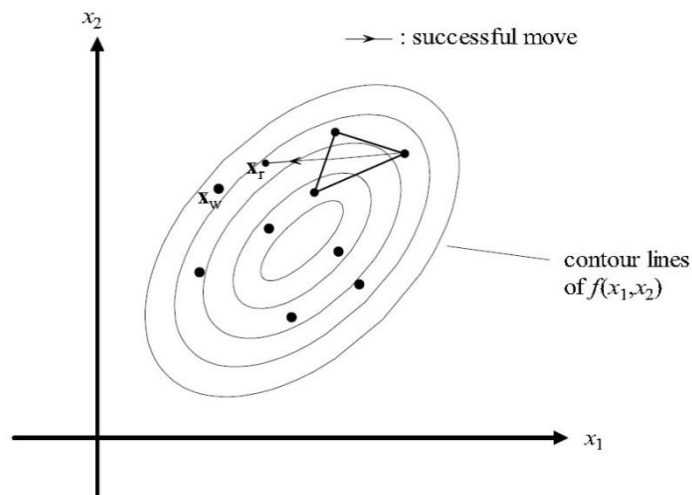


Figura 11 – Figura simplex montada a partir de inícios aleatórios.
Fonte: (PRICE et al., 2005)

Segundo PRICE (2005), a desvantagem desse algoritmo é que recolocar continuamente o atual pior ponto exerce uma alta pressão seletiva, o que pode forçar a população a convergir prematuramente.

Na plataforma de desenvolvimento mathematica[®] 8.0 o critério de convergência é determinado pela convergência do método local para cada ponto de início.

3.4. Dispositivos experimentais e levantamento de dados

Dos sete reservatórios estudados, somente os açudes do Cambito, Riacho Verde, Algodão e Fogareiro contavam com algum tipo de monitoramento; o açude do Fogareiro é monitorado diariamente pela COGERH; os açudes do Cambito, Riacho Verde e Algodão são monitorados mensalmente pela FUNCEME. Os açudes da Lagoa Cercada, Campina e Vista Alegre também são monitorados pela FUNCEME, mas de forma pouco esquematizada, uma vez que os mesmos não dispõem nem mesmo de réguas linimétricas.

Parte dos dispositivos experimentais utilizados para as medições em campo foram montados para o experimento e parte já se encontravam na bacia do riacho da Forquilha. As unidades de monitoramento de nível estão localizadas à beira de cada açude, enquanto que as estações pluviométricas se encontram ora na bacia, ora espalhadas pelo município de Quixeramobim.

3.4.1. Pluviometria

O experimento conta com nove postos pluviométricos espalhados pelo município de Quixeramobim; desses nove postos pluviométricos, um se encontra dentro da bacia do riacho da Forquilha e um se encontra próximo ao açude da Vista Alegre. Os demais postos pluviométricos estão espalhados pelo município de Quixeramobim, e pertencem à FUNCEME. Os sete que estão espalhados pelo município de Quixeramobim possuem uma série histórica consolidada, enquanto os outros dois foram montados exclusivamente para o projeto BEX.

Os pluviógrafos utilizados têm um sensor de precipitação tipo báscula com resolução de 0,2 mm/báscula e armazenam registros até atingir 320 cm de chuva; são do modelo S-RGB-M002, da marca ONSET, fornecidos pela empresa TRACOM. Os pluviógrafos Chico Monteiro e seu Zuca estão acoplados a um sensor de temperatura do ar (**Figura 12**).



Figura 12 – Estação pluviométrica e de temperatura do ar localizada dentro da sub-bacia do riacho da Forquilha.

As leituras nos datalogger acoplados aos pluviógrafos foram feitas a cada dez minutos; existem muitos buracos nas leituras devido a falhas de monitoramento que são compensadas pelo número de postos na região. A **Tabela 4**, mostra a medidas pluviométricas mensais, bem como as falhas, “buracos” nas medidas. Os dados

utilizados são do ano de 2011, janeiro à dezembro, e do ano de 2012, janeiro à junho; os dados de 2011 são utilizados para que seja possível comparar com os valores de 2012. Apesar do estudo ter se estendido até o mês de setembro de 2012, os dados de julho, agosto e setembro foram omitidos por terem leituras iguais a “zero milímetro”.

Tabela 4 –Postos pluviométricos e pluviometrias mensais em 2011 e 2012.

Mês	Lacerda (mm)	Paulo Zuca (mm)	Quixeramobim (mm)	Encantado (mm)	São Miguel (mm)	belem (mm)	Fogareiro (mm)	Manituba (mm)	Chico Monteiro (mm)	Média (mm)
janeiro-11	181.0		171.0	161.4	148.0	173.0	169.4	190.3	160.2	147.7
fevereiro-11	92.0		104.6	158.4	119.0	149.0	53.6	65.0	22.6	76.9
março-11	173.0		177.2	111.8	125.0	135.0	200.0	189.7		122.1
abril-11	134.0		137.2	151.6	197.0	179.0	112.8	147.2		110.0
maio-11	281.0		163.0	243.0	226.0	49.0	197.2	256.4		170.8
junho-11	153.0		118.6	80.1	111.0	50.0	72.6	100.6		79.5
julho-11	80.0		122.2	92.4	81.0	88.0	48.2	70.5		61.8
agosto-11			7.0	0.0	0.0		8.0	10.3		3.2
setembro-11			0.0	0.0	20.0		0.0	0.0		2.5
outubro-11			12.0	15.7	0.0		18.4	10.6		7.1
novembro-11			0.0	17.0	36.0		0.0	0.0		6.6
dezembro-11		3.4	0.0	0.0	0.0		0.0	18.0		2.7
janeiro-12	104.0	50.6	14.8	131.7	97.0	15.0	14.0	27.2		54.9
fevereiro-12		63.8	83.8		42.0	27.0	57.2	91.2	3.2	42.7
março-12	0.0	0.0	49.2	0.0	124.0	26.0	43.0	117.2	92.6	53.3
abril-12			79.4		12.0	20.0	20.8	9.2	12.6	16.8
maio-12			21.0		22.0		7.2	19.0	22.2	11.4
junho-12			22.0					54.0	11.2	10.9

Os “buracos” na **Tabela 4** são as falhas nas medidas.

3.4.2. Variáveis meteorológicas

As variáveis meteorológicas utilizadas nesse estudo são provenientes da estação meteorológica do INMET situada no município de Quixeramobim-CE. As variáveis utilizadas foram lâmina evaporada (método de Pichê), humidade relativa do ar e temperatura do ar; de todas elas foi utilizada a média mensal. Mesmo tendo utilizado para o estudo somente os valores referentes ao ano de 2012, foram plotados na **Figura 13** os valores referentes aos anos de 2011 e 2012 para fins de comparação.

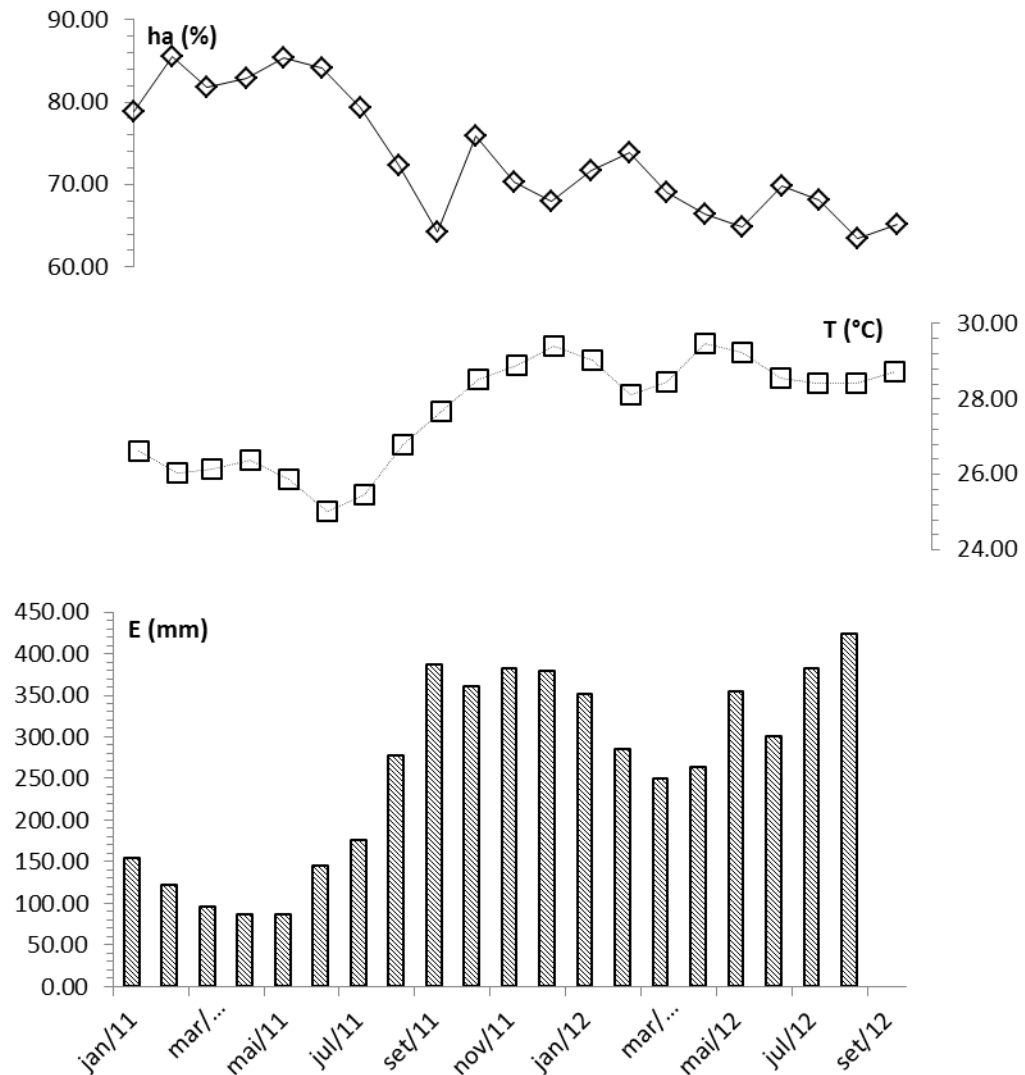


Figura 13 – Temperatura (T), lâmina evaporada segundo o método do evaporímetro de Pichê (E) e a umidade relativa do ar (ha) no período de janeiro de 2011 até setembro de 2012.

3.4.3. Geometria dos açudes

Inicialmente, para esse estudo, foi admitido que todos os reservatórios envolvidos podiam ser descritos por esse modelo geométrico; logo, esses parâmetros foram ajustados para todos os sete açudes. Os volumes dos açudes foram obtidos por meio de batimetrias minuciosas nos açudes; o processo de ajuste dos parâmetros à geometria dos reservatórios contou com a análise feita de vários métodos heurísticos de otimização seguidos de uma análise de sensibilidade do modelo às variações dos parâmetros.

Para a avaliação da geometria dos reservatórios também foi estudada a topografia do seu leito com base na análise de secções distribuídas ao longo de um modelo digital de elevação (MDE) montado a partir dos dados de batimetria.

3.4.4. Monitoramento de nível

O monitoramento semanal do nível dos açudes é essencial para o balanço hídrico utilizando isótopos estáveis; o monitoramento teve início no dia 15/02/2012 e término no dia 26/09/2012, a medida do nível dos reservatórios tentou, sempre que possível, seguir uma rotina de horários pré-estabelecida. Essa rigidez nos horários das coletas é necessária para respeitar o ciclo diário de estratificação das águas dos açudes (FILHO, 2006); esse monitoramento foi feito nos sete açudes estudados.

O monitoramento de nível foi feito manualmente sem o auxílio de nenhum sensor ou equipamento que automatizasse o processo; por isso, os dados coletados tem um passo temporal semanal.

A rede de monitoramento montada contou com as réguas linimétricas já existentes nos açudes Riacho Verde, Algodão, Cambito e Fogareiro e com réguas que foram colocadas exclusivamente para o estudo nos açudes da Vista Alegre, Lagoa Cercada e Campina, **Figura 14**. Durante a instalação as réguas foram niveladas com o sangradouro; elas foram instaladas de forma definitiva, mas infelizmente se encontravam fora d'água. Para a medição do desnível se utilizou uma mangueira de nível, uma vez que a distância da régua à água o permitia.

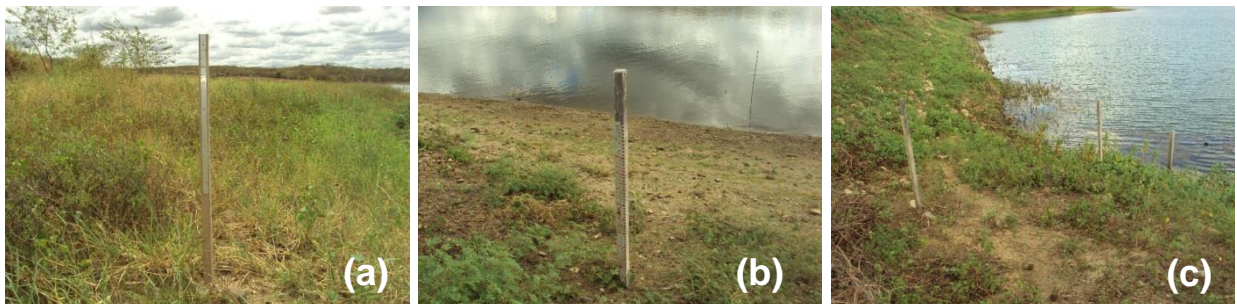




Figura 14 – Réguas linimétricas instaladas para a mediçãod e nível nos açudes. (a) Açude da Lagoa Cercada, (b) Açude do Cambito, (c) Açude do Riacho Verde, (d) Açude do Algodão, (e) Açude da Campina, (f) Açude da Vista Alegre.

Apesar do monitoramento de nível ter começado no mesmo dia para todos os reservatórios, nem todos contam com todos os valores de nível semanais amostrados, esses “furos” nas medidas se devem a falhas no monitoramento causadas por fatos supervenientes, mas, dos sete açudes monitorados, somente os açudes da Vista Alegre e Campina tiveram grandes perdas nas amostragens.

3.4.5. Batimetria

A batimetria nos reservatórios ocorreu com a ajuda da COGERH que forneceu todo o material necessário para a conclusão do trabalho; todas as batimetrias tiveram duração máxima de 2 dias. Dos sete açudes, os que tiveram seus perfis traçados pela processo batimétrico foram: Riacho Verde, Cambito, Lagoa Cercada, Campina e Vista Alegre. Não foi possível realizar campanhas de batimetria no açude do Algodão, pelo seu alto grau de eutrofização e no açude do Fogareiro, devido à sua extensão. Uma batimetria no açude do Fogareiro demandaria muito tempo e uma grande equipe, algo com que não se contava nesse estudo. Portanto, para a avaliação da geometria desses dois reservatórios foram utilizadas suas curvas cota x área x volume (CAV) de projeto.

O modelo de ecobatímetro utilizado para a batimetria trabalha em dupla frequência com uma precisão de 10 cm nas medições de profundidade, PLOTTER ECHOSOUNDER FURUNO GP-1650. O ecobatímetro possui um GPS acoplado que pode trabalhar utilizando a tecnologia WaaS (WLAN as Service). A acurácia na precisão do GPS/WaaS está na faixa de 3 m à 10 m. A **Figura 15** mostra o modelo do ecobatímetro como visto no manual de instruções do produto.

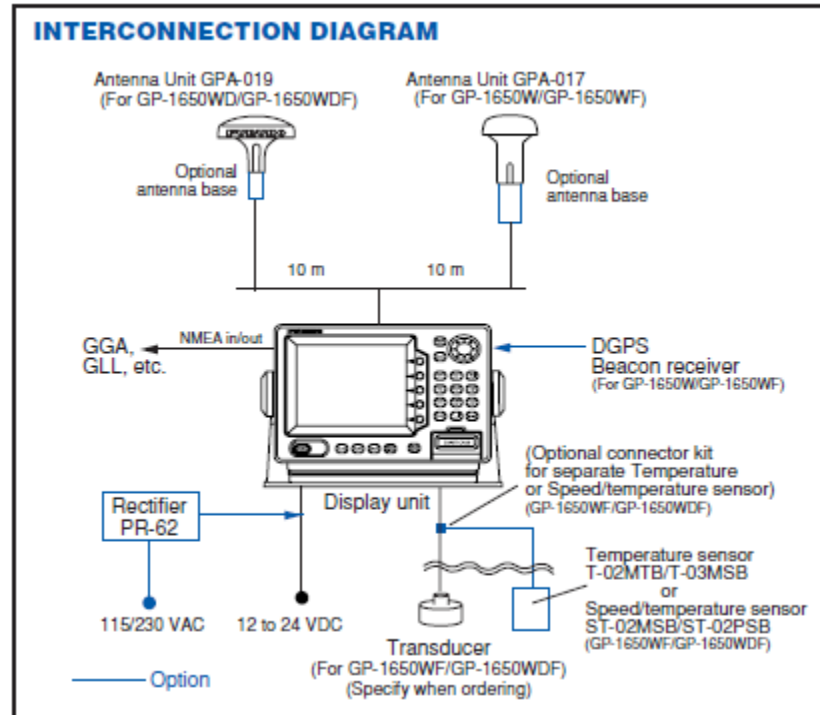


Figura 15 – Ecobatímetro utilizado durante a batimetria dos reservatórios. Fonte: (“Color LCD GPS/WAAS PLOTTER,” 2003)

O barco utilizado para o trajeto também pertence a COGERH, ele foi utilizado para a coleta de pontos ao longo dos açudes. Foi acoplado a esse barco um motor de 8 CV para o seu deslocamento sem a necessidade de remo e mais de um tripulante na embarcação, **Figura 16.**



Figura 16 – Barco utilizado durante as campanhas de batimetria.

A coleta de pontos ocorria da seguinte forma: a embarcação seguia com um único tripulante a bordo. Esse tripulante era responsável por manobrar o barco em “zig-zag” para que fosse possível capturar o máximo de pontos no açude. Dentro do barco ficavam um notebook, o ecobatímetro e uma bateria de carro. O mesmo operador do barco também operava o ecobatímetro e o computador. A coleta automática de pontos facilitava o processo.

As campanhas de batimetria tiveram início no dia 16/04 e término do dia 25/05 de 2012.

3.5. Montagem das curvas cota x área x volume (cav)

A montagem das curvas CAV e a interpolação dos dados foi realizada com o auxílio do software ArcGIS® 9.3. Para o tratamento de dados, se utilizou a malha de pontos gerada a partir da batimetria em cada açude. A partir da malha de pontos foi gerado para cada reservatório um raster de curvas de nível. Devido a impossibilidade de realizar o contorno manual da bacia hidráulica máxima de cada açude foi vetorizada uma imagem LANDSAT 5 para aproximação da área máxima do espelho d'água. A imagem é datada do dia 24/07/2004, período em que os açudes se encontravam próximos do seu ponto de sangria, ou sangrando.

Para referência de cota em cada açude foi considerado o topo de sua régua linimétrica como tendo cota igual a 100 m.

A interpolação dos dados foi feita utilizando a ferramenta “*topo to raster*” do software ArcGIS 9.3, essa função é um método de interpolação designado especificamente para a criação de um modelo digital de elevação (MDE) hidrologicamente correto. O método usa uma técnica de interpolação baseada em iterações de diferenças finitas. Como a batimetria foi realizada enquanto o açude se encontrava com uma cota mais baixa do que a cota de sangria, durante a interpolação dos dados buscou-se suavizar ao máximo a interpolação nas cabaceiras dos açudes minimizando dessa forma a perda de volume ao máximo.

Para a obtenção dos dados de cota, área e volume foi montado um modelo baseado em diagramas de fluxos para o software ArcGIS 9.3, Figura 17. O modelo calcula, utilizando a ferramenta *surface volume*, a área 2D (área da bacia hidráulica) em metros quadrados e o volume do açude em metros cúbicos. Após calcular essas

duas variáveis para cada cota estabelecida é montado um arquivo do tipo (.txt) em que se pode montar a curva CAV para cada açude facilmente. Além desse modelo construído no “*Model Builder*” também se desenvolveu um “script” em Python para a construção da curva CAV a partir da interface Python/ArcGIS®.

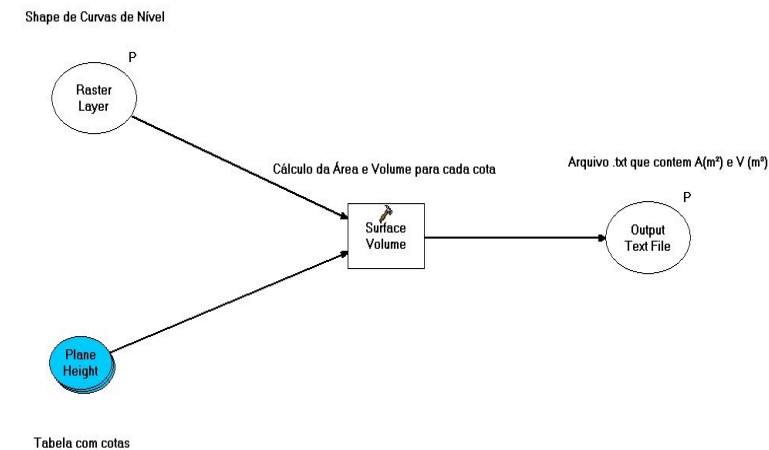


Figura 17- Modelo para a confecção da CAV no ArcGIS 9.3.

3.6. Amostragem isotópica

A amostragem isotópica foi feita em garrafas de plástico de 30 mL. Essas garrafas possuem uma tampa do tipo lacre e usam um batoque para evitar o processo de evaporação direto da garrafa, constituindo um sistema hermeticamente fechado (**Figura 18**); todas as garrafas foram devidamente etiquetadas e enviadas para o laboratório de análises.



Figura 18 - Garrafa usada para coleta de água para análises isotópicas.

As coletas tiveram início no dia 15/02 e encerramento no dia 26/09 de 2012, as coletas eram seguidas da verificação do nível dos açudes.

As amostragens ocorriam a cerca de 200 m da parede de cada açude, medida adotada para evitar efeitos de borda. A água era coletada a cerca de 1 m de profundidade, medida a partir da superfície do açude.

3.7. Processo de otimização dos parâmetros geomorfológicos

Para a análise geomorfológica do açude se estudou os dois parâmetros propostos por MOLLE e CADIER (1992), o coeficiente de forma (α) e o coeficiente de abertura (K). Os parâmetros ' α ' e ' K ' foram calibrados para cada açude. A função objetivo usada foi a de Nash e Sutcliffe (1970) (NSE).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{avg})^2} \quad (14)$$

Onde O_i é o valor medido, P_i o valor modelado e O_{avg} a média dos valores medidos. A função de NSE tem valor máximo igual a '1'.

Os Parâmetros foram calibrados seguindo as equações propostas por MOLLE e CADIER (1992).

$$V = K \cdot H^a \quad (15)$$

$$A = \alpha \cdot K \cdot H^{(a-1)} \quad (16)$$

onde, H é a diferença entre uma cota qualquer e a cota mínima do reservatório, V o volume do reservatório e 'A' a área da bacia hidráulica.

Durante a calibração dos parâmetros percebeu-se que ao calibrar 'a' e 'K' utilizando a equação (15) o NSE dava valores diferentes do que quando se calibrava utilizando a equação (16). Quando se fazia a calibração utilizando a equação (15), tendo como variável de saída o volume, era encontrado um certo par (a , K) ótimo, mas quando a calibração dos parâmetros ocorria utilizando a equação (16), tendo como variável de saída a superfície da bacia hidráulica, se encontravam outros valores de 'a' e 'K' ótimos. Isso significa que, quando se utilizava a equação (15) se privilegiava a relação entre volume medido e volume modelado e quando se utilizava a equação (16) se privilegiava a relação entre superfície medida e superfície modelada.

Para resolver essa situação, foi considerada uma nova função objetivo FO que considera os dois NSE citados anteriormente.

$$FO = (1 - NSE_V)^2 + (1 - NSE_A)^2 \quad (17)$$

A função objetivo FO utiliza os valores de NSE obtidos quando são comparados os valores medidos e modelados do volume (NSE_V) e da superfície da bacia hidráulica (NSE_A); essa função tem como valor mínimo o '0' e pondera os valores de NSE obtidos para as relações entre volume e cota (V-H) e superfície e cota (S-H). Subtraindo de 1 os valores de NSE encontrados obtém-se a relação de

proximidade do melhor valor da função objetivo para as relações entre V-H e S-H. Elevando ao quadrado cada termo, ocorre um “beneficiamento” de valores entre 0 e 1 e uma “punição” para valores maiores que 1; os termos da função terão valor positivo e a adição dos termos serve para afastar os resultados obtidos do valor mínimo da função. Essa função demonstrou manter certa homogeneidade entre os resultados de NSE encontrados para as duas relações supramencionadas. Duas simulações foram realizadas:

Simulação 1 – Resultado: valores de NSE muito diferentes, com $NSE_V = 0,99$ e $NSE_A = 0,1$, para esses valores de NSE temos $FO = 0,8101$.

Simulação 2 – Resultado: Valores de NSE próximos com $NSE_V = 0,5$ e $NSE_A = 0,5$, para esses valores de NSE temos $FO = 0,5$.

Note que apesar de ter valores mais baixos de NSE, a segunda simulação foi privilegiada em detrimento da primeira, mostrando que a função prima pela homogeneidade dos resultados, punindo desvios grandes.

As condições de contorno são “0” e $+\infty$, como é demonstrado a seguir.

Sejam os limites de NSE $-\infty$ e 1, então:

$$-\infty < NSE \leq 1,$$

$$-1 \leq -NSE < +\infty,$$

$$0 \leq 1 - NSE < +\infty,$$

$$0 \leq (1 - NSE)^2 < +\infty,$$

O que implica que a função objetivo FO também está contido nesse intervalo.

Para o processo de otimização foram utilizados e comparados quatro métodos. São eles: *Differential Evolution* (STORN, R.; PRICE, 1997), *Nelder e Mead* (LUERSEN; RICHE, LE, 2004), *Random Search* (JEŻOWSKI et al., 2005) e *Simulated Annealing* (KIRKPATRICK et al., 1983). O critério para a escolha do

melhor método foi o valor da função objetivo. Esses métodos são baseados em algoritmos heurísticos e têm como objetivo uma busca rápida dos parâmetros ótimos globais da equação. Para o processo de otimização contou-se com o auxílio da plataforma de desenvolvimento *mathematica 8.0*.

Após definidas as funções objetivo e os métodos de otimização, foram obtidos os valores de α e K para cada um dos métodos, bem como para cada uma das relações otimizadas.

Para a averiguação da “duplicidade” dos valores de NSE (NSE_v e NSE_a) seguiu-se o procedimento: varreu-se todas as combinações possíveis de α e K , calculando um par (NSE_v, NSE_a) para cada par (α , K). O passo utilizado foi de 0,01. Com isso, é possível avaliar e justificar a metodologia encontrada. Após a obtenção dos pares (NSE_v, NSE_a) montou-se um gráfico, em várias escalas. A intenção do gráfico é mostrar a seguinte questão: para uma situação em que houvesse um único par (α , K) que representasse a geometria do reservatório ocorreria que quando se otimizasse a relação $V \times H$ obtive-se um NSE_v igual a 'x' e quando se aplicasse os valores dos parâmetros otimizados pela relação $V \times H$ na equação derivada do volume se obteria um NSE_a igual a y, que seria o mesmo que se obteria ao otimizar a relação $A \times H$. Porém, ao se otimizar a relação $V \times H$ obtive-se um NSE_v igual a x, e aplicando os parâmetros ótimos obtidos através dessa relação obtive-se um NSE_a para o ajuste utilizando a relação $A \times H$ igual a y; contudo, ao realizar o processo inverso, otimizando $A \times H$ ao invés de $V \times H$, obtive-se um par NSE_v e NSE_a diferente de x e y, o que implica em parâmetros ótimos diferentes. Vale a pena mais uma vez ressaltar que o problema não se trata de um caso multiobjetivo já que a função objetivo usada é a mesma, a diferença se encontra na prioridade dada a uma relação em detrimento da outra.

3.8. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada para determinar a influência dos parâmetros 'a' e 'K' sobre a predição dos valores de Volume e Área da bacia hidráulica. A sensibilidade foi aproximada usando a sensibilidade relativa linear (S_P) (WHITE; CHAUBEY, 2005)

$$S_p = (\Delta F/F)/(\Delta P/P) \quad (18)$$

onde, F é a função objetivo e P o parâmetro a ser estudado; oO parâmetro com maior S_p tem maior influência sobre as variáveis de saída do modelo. A principal limitação dessa abordagem é a suposição de linearidade feita para a aproximação. A função objetivo utilizada para essa análise foi a função objetivo FO, escolhida por representar bem a relação V-S-H em detrimento do NSE que privilegia apenas um par de variáveis.

O teste foi realizado fazendo variações de $\pm 1\%$ à $\pm 10\%$ nos parâmetros 'a' e 'K', a partir de seus valores ótimos. Os valores dos parâmetros não foram alterados simultaneamente, enquanto se fazia a alteração do valor de 'a' mantinha-se 'K' no seu ótimo valor e vice-versa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Batimetria dos açudes

O ecobatímetro foi programado para capturar profundidades a cada 1,5 metros em uma malha muito densa de pontos. As informações sobre as batimetrias estão detalhadas na **Tabela 5**:

Tabela 5- Dados das batimetrias realizadas nos açudes em estudo no ano de 2012.

Açude	Início	Término	Pontos Coletados	Pontos/Área (ha)⁻¹	Profundidade Máx. coletada (m)
Campina	16/04	19/04	11088	137,31	9,21
Lagoa Cercada	02/05	02/05	3118	123,38	5,41
Riacho Verde	03/05	04/05	11786	133,90	12,41
Cambito	22/05	23/05	7354	378,69	7,41
Vista Alegre	24/05	25/05	7968	270,04	6,91

As profundidades máximas encontradas durante a batimetria não correspondem aos valores de profundidade máxima dos açudes, mas às profundidades encontradas no dia da batimetria, todos os açudes durante as batimetrias se encontravam abaixo do seu nível de sangria. A densidade de pontos (pontos/área) corresponde ao total de pontos coletados em relação à área máxima da bacia hidráulica do açude.

Devido à quantidade de açudes não foi possível fazer o contorno individualizado com um GPS. Para estimar a área da bacia hidráulica e montar a curva COTA x ÁREA x VOLUME foi utilizada uma imagem LANDSAT 5 datada do dia 24/07/2004, quando os açudes se encontravam muito próximos de seu ponto de sangria, ou mesmo sangrando.

4.2. Curvas cota x área x volume (CAV)

4.2.1. Açude do Cambito

A malha de pontos e o MDE gerado para o açude do Cambito pode ser visto na **Figura 19(b)** e **Figura 19(a)**, respectivamente. Note que na **Figura 19(a)**, na parte superior da imagem, na cabeceira do açude é possível perceber um baixo adensamento de pontos. Isso se deve ao baixo nível em que o açude se encontrava durante o trabalho de batimetria, inviabilizando o prosseguimento da navegação com o barco e a coleta de pontos.

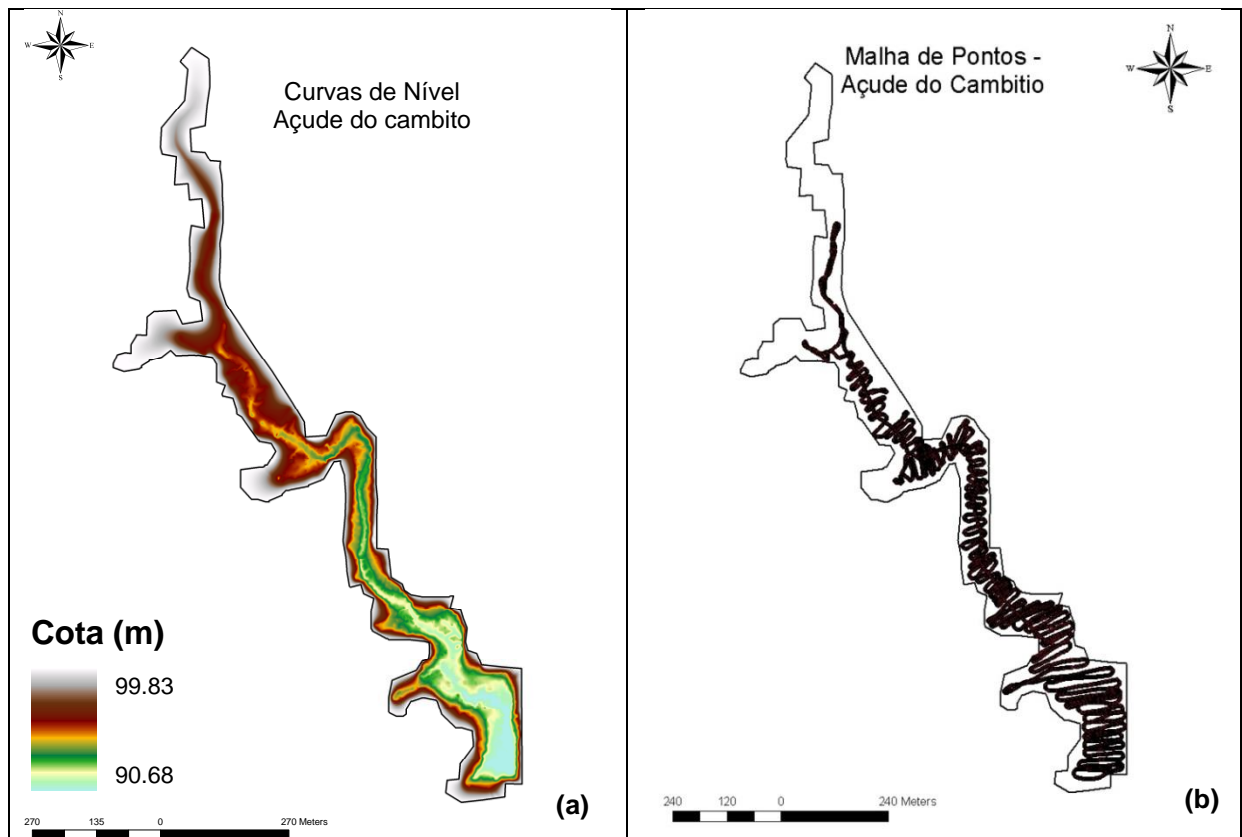


Figura 19 - (a) Curvas de nível geradas a partir da interpolação da malha de pontos (b) Malha de pontos obtida durante a batimetria.

A cota relativa de sangria do açude é 99,83 m, durante a batimetria era de 98,09 m, ou seja, 1,74 m abaixo do seu nível de sangria. A cota relativa mínima encontrada no açude após a interpolação foi de 90,68 m, ou seja, 9,15 m abaixo do nível de sangria.

A curva CAV montada para o açude do Cambito é mostrada na **Figura 20** onde se observa uma curva suave na relação entre cota e volume. Contudo, na curva montada a partir da relação entre a cota e a área verifica-se uma mudança

brusca entre as cotas 99,50 m e 99,83 m, devido à extrapolação feita para a obtenção do volume total do reservatório e a baixa densidade de pontos na cabeceira do açude. A extrapolação foi necessária, uma vez que o açude se encontrava, durante a batimetria, com uma cota 1,74 m abaixo da sua cota de sangria.

Para fins de comparação pode-se usar o trabalho realizado por BURTE (2008) que estimou o valor da área máxima em 18 ha e do volume máximo em $9,7 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ em detrimento dos 19,4 ha e $6,26 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ encontrados nesse trabalho. Essa diferença pode ser minimizada a partir de um adensamento dos pontos na cabeceira do açude quando o mesmo estiver próximo do seu ponto de sangria.

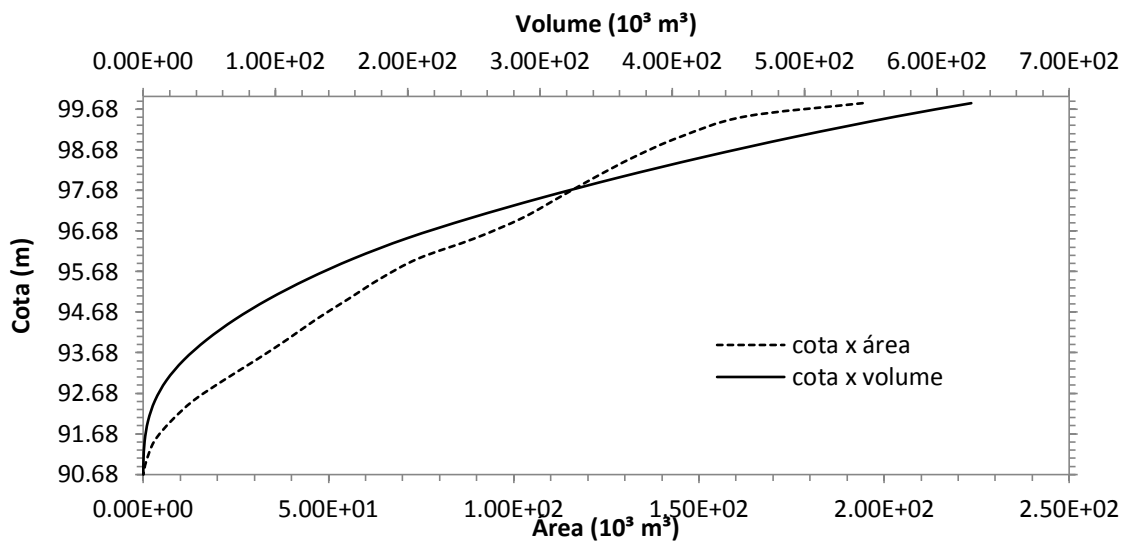


Figura 20 - Curvas CAV do açude do Cambito

4.2.2. Açude do Riacho Verde

A malha de pontos e o MDE gerado para o açude do Riacho Verde pode ser visto na **Figura 21(a)** e na **Figura 21(b)**, respectivamente. Como no açude do Cambito, as cabeceiras não foram privilegiadas pelo trabalho de batimetria, já que essa parte do açude se encontrava muito eutrofizada impedindo o livre deslocamento do barco. Contudo, não é visto nas suas curvas CAV a mesma

descontinuidade que é vista na curva do açude do Cambito. Isso se deve ao fato de que as profundidades próximas à cabeceira desse açude eram maiores do que as profundidades encontradas no açude do Cambito, o que permitiu melhor interpolação dos dados.

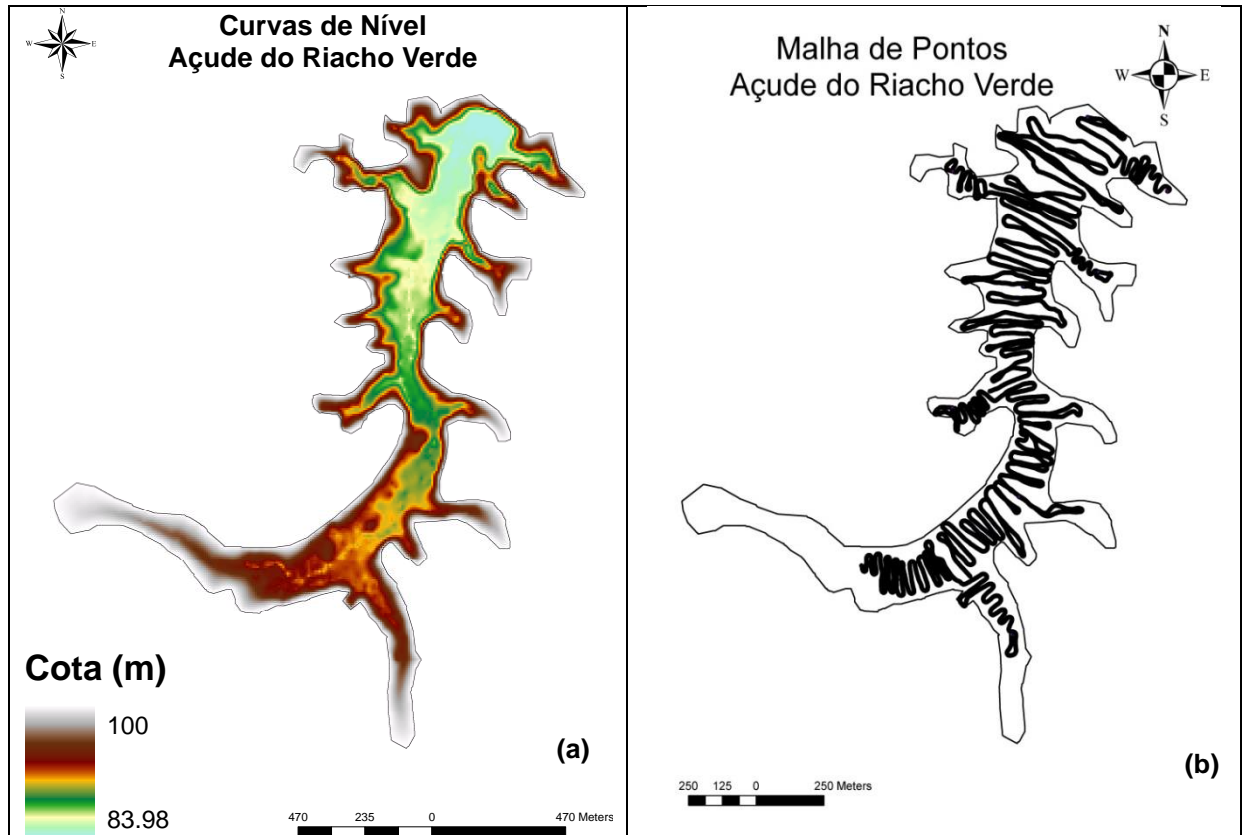


Figura 21- (b) Malha de pontos obtida durante a batimetria. (a) Curvas de nível geradas a partir da interpolação da malha de pontos

A cota relativa de sangria do açude é 100 m; durante a batimetria era de 96,55 m, ou seja, 3,45 m abaixo do seu nível de sangria. A cota relativa mínima após a interpolação foi de 83,98 m, ou seja, 16,04 m abaixo do nível de sangria.

Na **Figura 22** estão as curvas CAV montadas para o açude do Riacho Verde, mostrando que não há uma mudança brusca nos últimos valores de cota como ocorre no açude do Cambito. A curva cota x volume é suave seguindo uma tendência polinomial. A curva Cota x Área aproxima-se de uma reta, em alguns pontos com leves flutuações.

Para fins de comparação pode-se usar o trabalho realizado por BURTE (2008) que estimou o valor da área máxima em 80 ha e de volume máximo em 6,7.

10^6 m³ em detrimento dos 88,02 ha e $5,63 \cdot 10^6$ m³ encontrados nesse trabalho. Estes valores mostram que apesar dos dados de BURTE (2008) terem sido estimados na modelagem para a bacia do Riacho da Forquilha eles são próximos dos dados reais medidos na batimetria. Assim como no caso do açude do Cambito, acredita-se que pode haver aproximação maior dos resultados realizando a batimetria no período de sangria do açude.

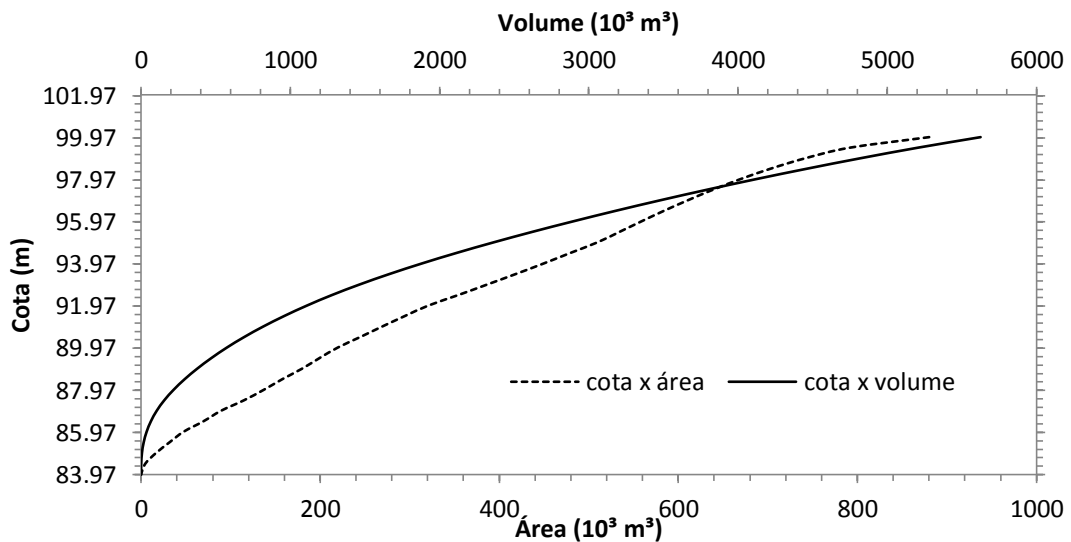


Figura 22 - Curvas CAV do açude do Riacho Verde.

4.2.3. Açude da Lagoa Cercada

A malha de pontos e o MDE gerado para o açude Lagoa Cercada são mostrados na **Figura 23(a)** e na **Figura 23(b)**, respectivamente. Como no açude do Cambito, as cabeceiras não foram privilegiadas com o trabalho de batimetria, pois parte do açude se encontrava muito rasa, impedindo a coleta de pontos. Logo, na passagem da cota 98,50 m para a cota 99,00 m é possível perceber uma leve mudança na tendência da curva Cota x Área, como foi observado no açude do Cambito.

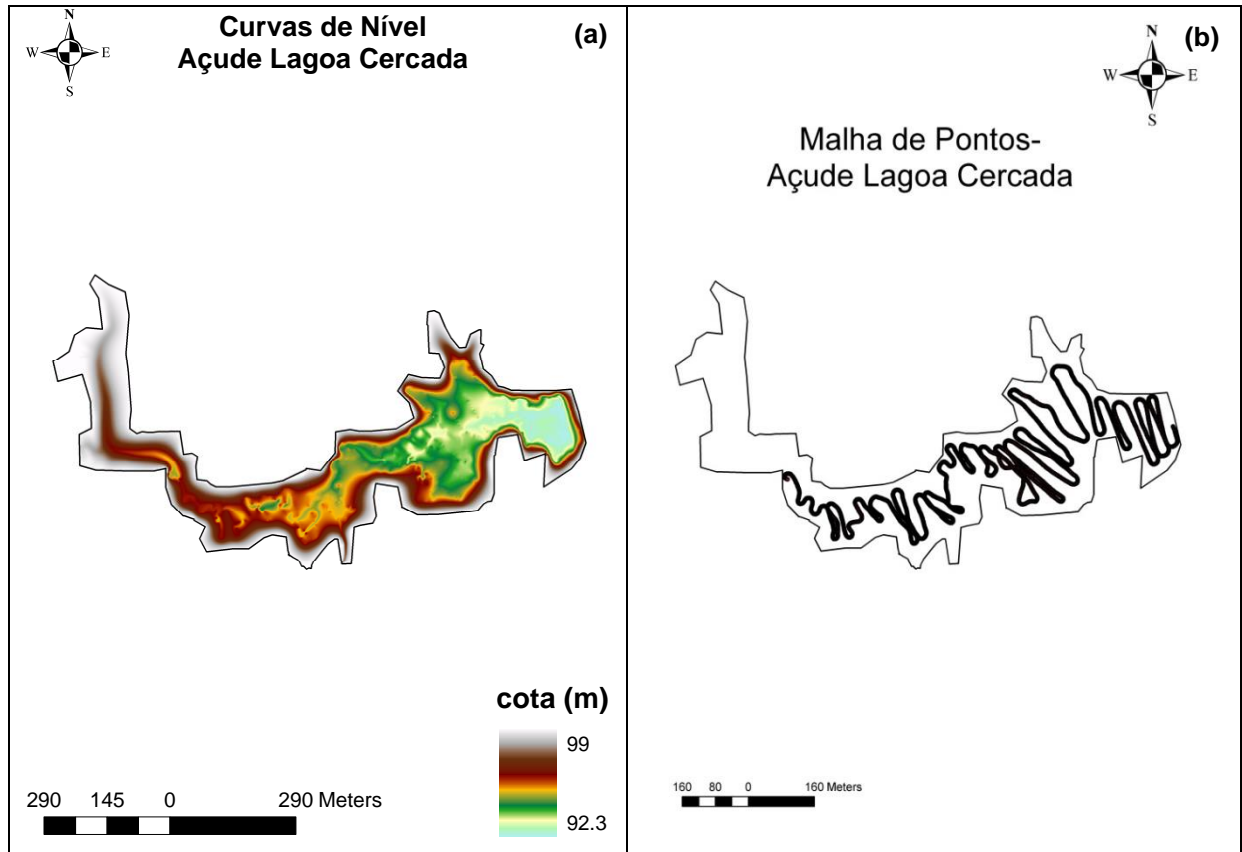


Figura 23- (a) Curvas de nível geradas a partir da interpolação da malha de pontos. (b) Malha de pontos obtida durante a batimetria.

A cota relativa de sangria do açude é 99 m, durante a batimetria era de 97,76 m, ou seja, 1,24 m abaixo do seu nível de sangria. A cota relativa mínima encontrada no açude, após a interpolação, foi de 92,33 m, ou seja, 6,67 m abaixo do nível de sangria.

A **Figura 24** mostra a curva CAV para o açude Lagoa Cercada, a curva cota x volume é suave seguindo uma tendência polinomial. A curva cota x área aproxima-se de uma reta.

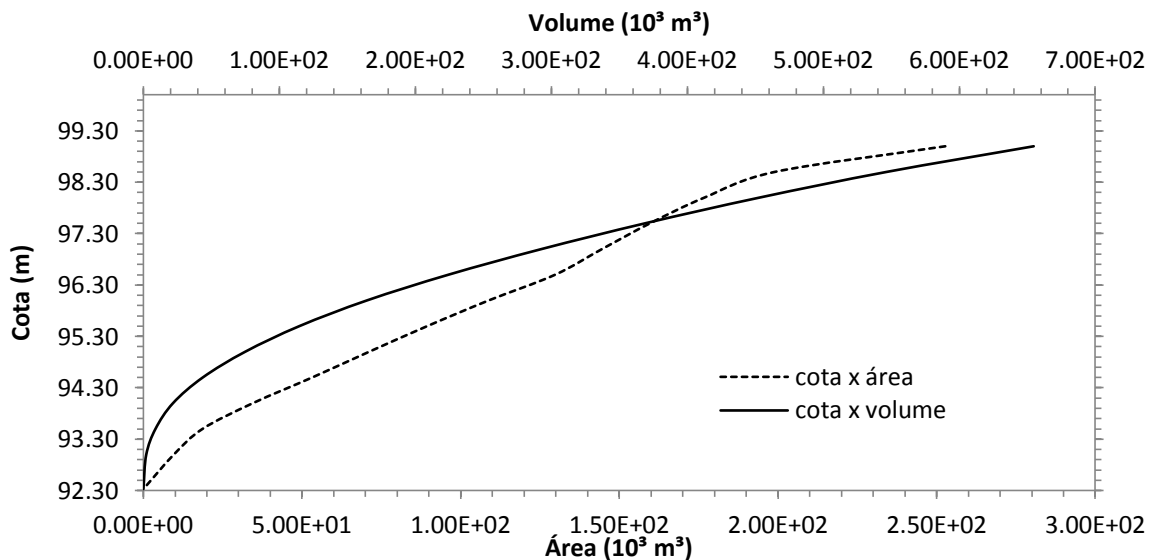


Figura 24 - Curva CAV do açude Lagoa Cercada.

Para fins de comparação pode-se usar o trabalho realizado por BURTE (2008) que estimou o valor da área máxima em 31 ha e de volume máximo em $1,30 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ em detrimento dos 25,27 ha e $6,55 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ encontrados nesse trabalho. Dos três açudes discutidos este foi o que mostrou uma maior discrepância entre trabalhos dados atuais e os de BURTE (2008). Provavelmente, a modelagem de BURTE (2008) não considerou que cerca de 60% do açude se encontrava com profundidades entre 2,65 m e 4,75 m (**Figura 25**). Esse resultado mostra homogeneidade entre as profundidades menores encontradas no açude. O histograma (**FIGURA 25**) relaciona os dados encontrados durante o trabalho de batimetria; as profundidades a partir do histograma, deve-se subtrair o valor da cota 99,00 m, ou seja, da cota de sangria.

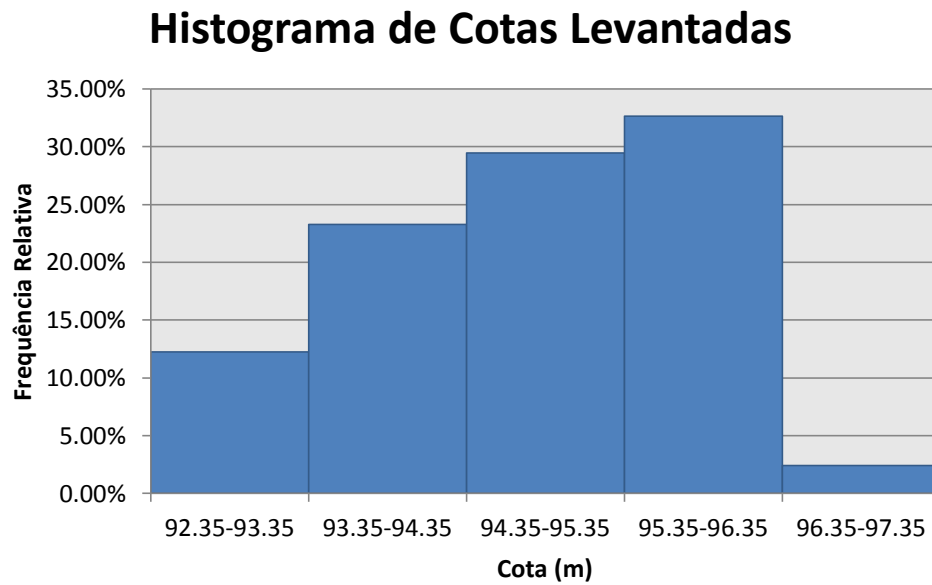


Figura 25 - Histogramas das cotas levantadas durante a batimetria no açude Lagoa Cercada.

4.2.4. Açude da Vista Alegre

A malha de pontos e o MDE gerados para o açude da Vista Alegre são mostrados na **Figura 26(a)** e na **Figura 26(b)**, respectivamente. Como nos demais açudes, as cabeceiras não foram privilegiadas pelo trabalho de batimetria, pois se encontrava eutrofizado, impedindo o prosseguimento do barco. Esse detalhe tem influência direta sobre os extremos da curva CAV, o que gera leves descontinuidades nas passagens entre as cotas próximas à de sangria.

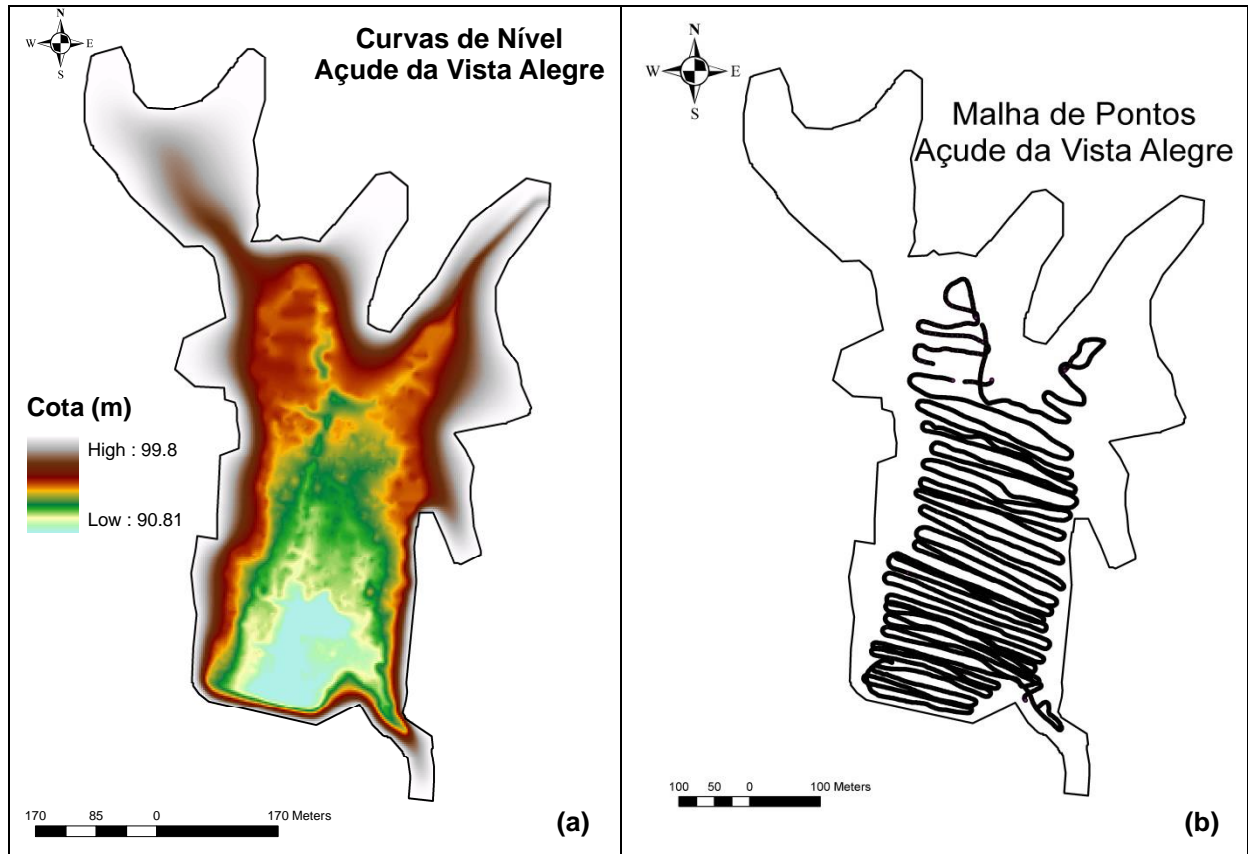


Figura 26 - (a) Curvas de nível geradas a partir da interpolação da malha de pontos. (b) Malha de pontos obtida durante a batimetria.

A cota relativa de sangria do açude é 99,80 m, durante a batimetria era de 97,72 m, ou seja, 2,08 m abaixo do seu nível de sangria. A cota relativa mínima encontrada no açude após a interpolação foi de 90,81 m, ou seja, 8,99 m abaixo do nível de sangria.

A **Figura 27** mostra a curva CAV montada para o açude Vista Alegre. A curva Cota x Volume é suave seguindo uma tendência polinomial e a curva Cota x Área mostra vários pontos de flutuação dos resultados.

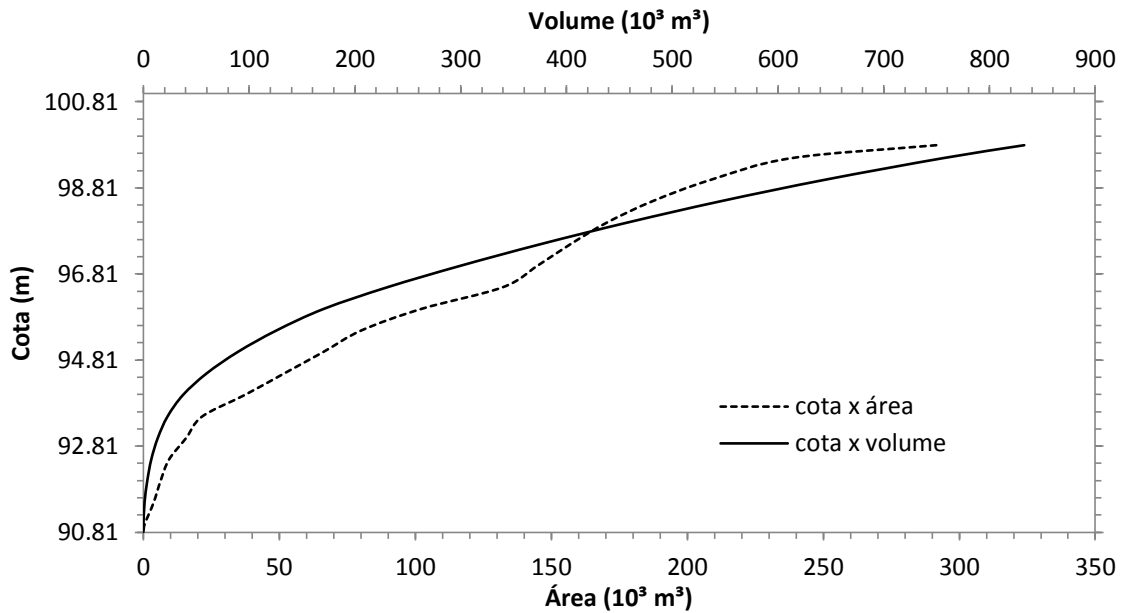


Figura 27 - Curva CAV do açude Vista Alegre.

4.2.5. Açude da Campina

A malha de pontos e o MDE gerado para o açude da Campina podem ser vistos na **Figura 268(a)** e **Figura 268(b)**, respectivamente. A batimetria feita nesse reservatório apresentou vários furos. Esses furos são devido ao grande número de árvores dentro açude. Essas árvores impediram o livre deslocamento da lancha até as regiões mais extremas do reservatório. Além de providenciar caminhos tortuosos na malha de pontos. Apesar da batimetria ter contemplado muito pouco as cabeceiras desse açude, acredita-se que a perda de volume tenha sido parcialmente corrigida no processo de interpolação dos dados.

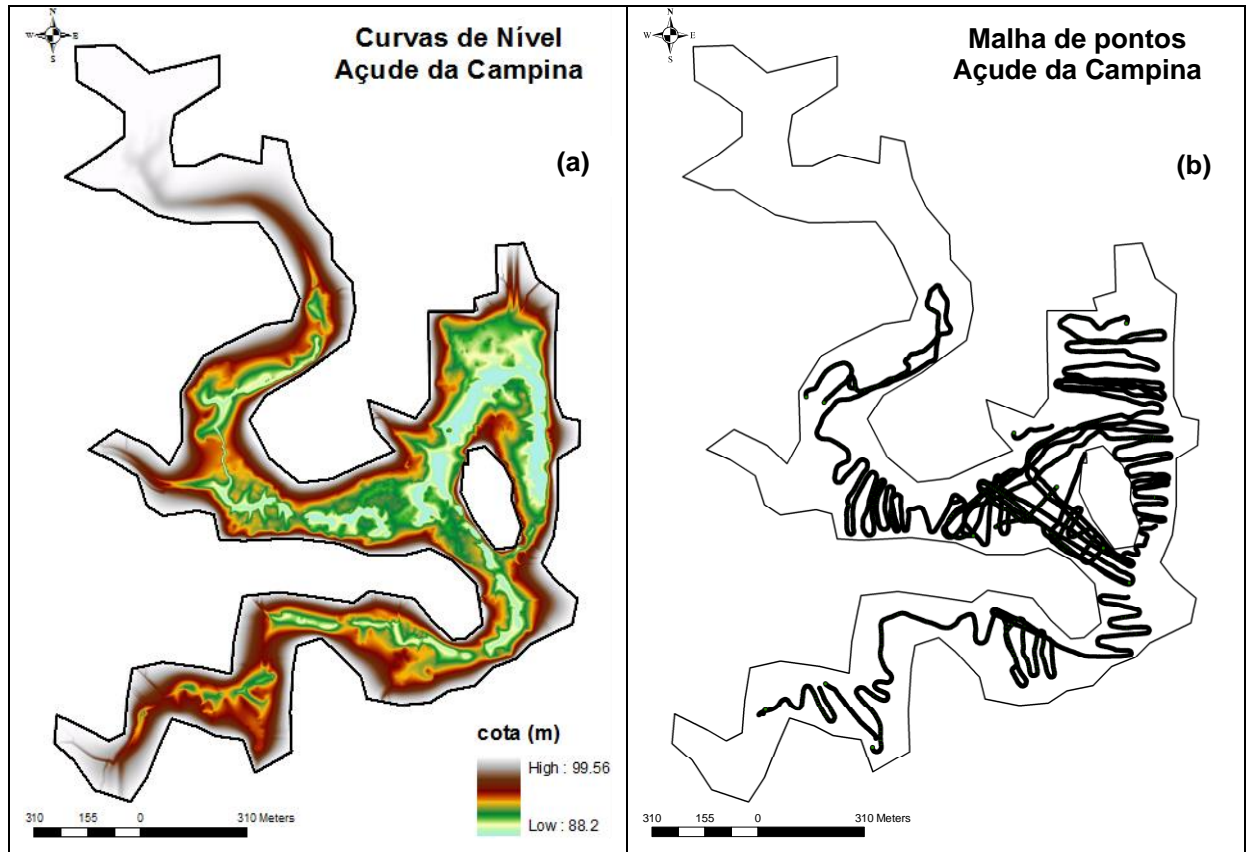


Figura 28 - (a) Curvas de nível geradas a partir da interpolação da malha de pontos. (b) Malha de pontos obtida durante a batimetria.

A cota relativa de sangria adotada para o reservatório foi de 99,56 m, durante a batimetria era de 97,41 m, ou seja, o açude se encontrava a 2,15 m abaixo do seu nível de sangria. A cota relativa mínima encontrada após a interpolação foi de 88,2 m, ou seja, 11,36 m abaixo do nível de sangria. O reservatório apresenta uma área máxima de espelho d'água de 119 ha e uma volume máximo de $4,03 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Na **Figura 29** é possível observar a curva CAV montada para o açude da Campina. As curvas tanto de Cota x Volume como de Cota x Área mostraram rápido crescimento para valores mais baixos de cota e um lento crescimento nos valores de cotas mais altas efeito da não existência de uma malha de pontos na cabeceira, o que provocou, no momento da interpolação dos dados, curvas suaves nas laterais dos reservatórios.

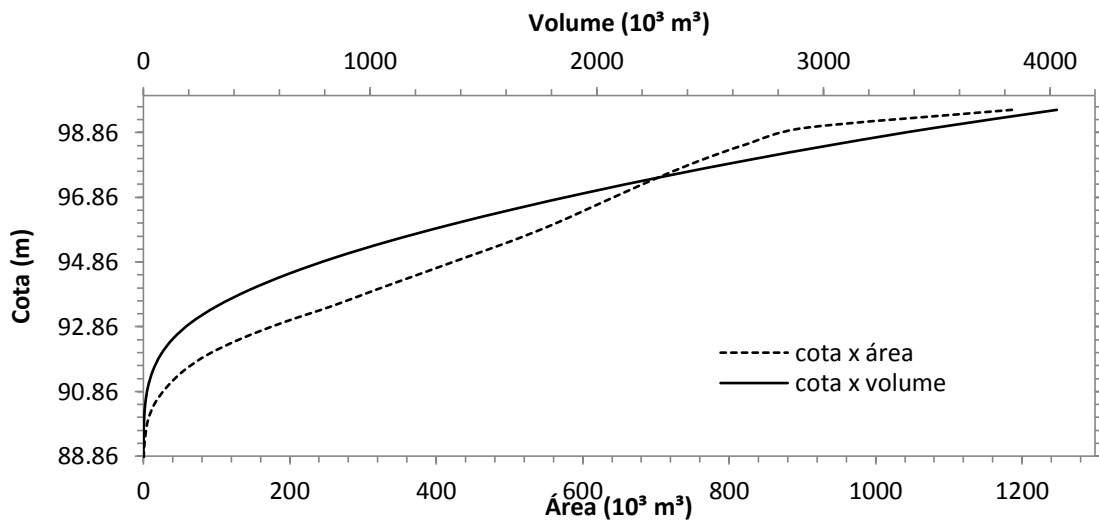


Figura 29 - Curva CAV do açude da Campina.

4.2.6. Açude do Algodão

Não foi realizada batimetria no açude Algodão, não sendo possível mostrar uma análise tão minuciosa das características morfométricas do açude. A curva CAV do açude utilizada para esse estudo foi a do projeto de construção. Portanto, espera-se que os valores de volume sejam superestimado devido ao processo assoreamento do reservatório.

Para esse reservatório, foi estabelecida uma cota de sangria igual a 100 m e a cota mínima de projeto foi de 86 m. Portanto, segundo o projeto original, o reservatório possui uma profundidade máxima de, aproximadamente, 14 m. Com esses dados é possível estimar que a profundidade máxima do reservatório no início do período de coletas no açude, 07/03/2012, era de 12,59 m, ou seja, o reservatório se encontrava a 1,41 m do seu ponto de sangria. A área e o volume de projeto encontrados utilizando a curva CAV foi de 32 ha e $1,98 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, respectivamente.

A **Figura 30** mostra a curva CAV de projeto do reservatório.

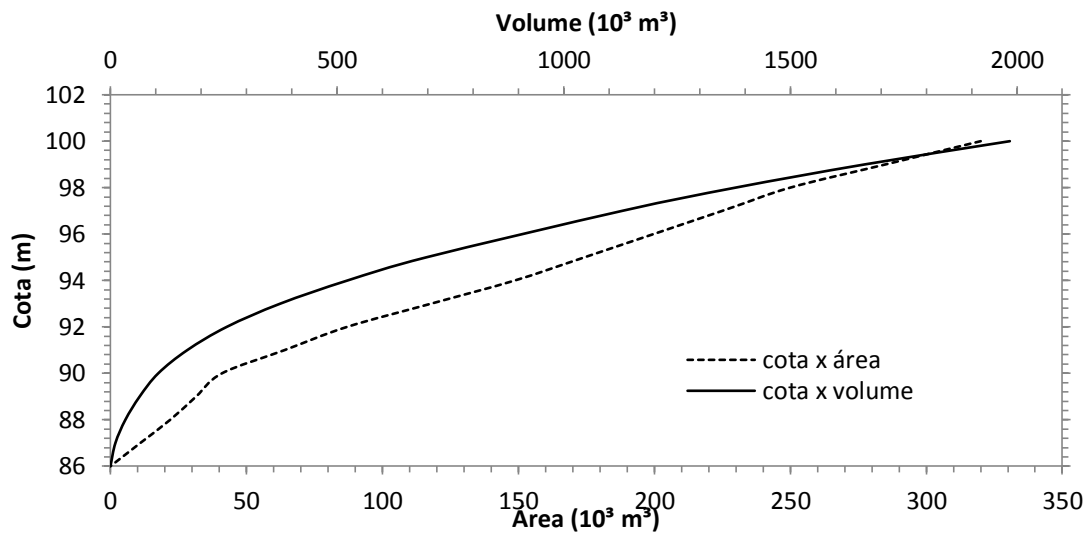


Figura 30 – Curva CAV do açude Algodão.

4.2.7. Açude do Fogareiro

O açude do Fogareiro, assim como o açude do Algodão, não teve batimetria desenvolvida para esse trabalho por causa do escasso número de membros da equipe.

Para a análise morfométrica desse reservatório contou-se com sua curva CAV de projeto, cedida pela COGERH. Segundo a curva CAV de projeto, o reservatório do Fogareiro tem uma profundidade máxima de 31,2 m e uma cota de sangria igual a 236,2m. A área máxima e o volume máximo do reservatório são 1850 ha e $1,19 \cdot 10^8$ m³, respectivamente.

A **Figura 31** mostra a curva CAV de projeto do açude do Fogareiro.

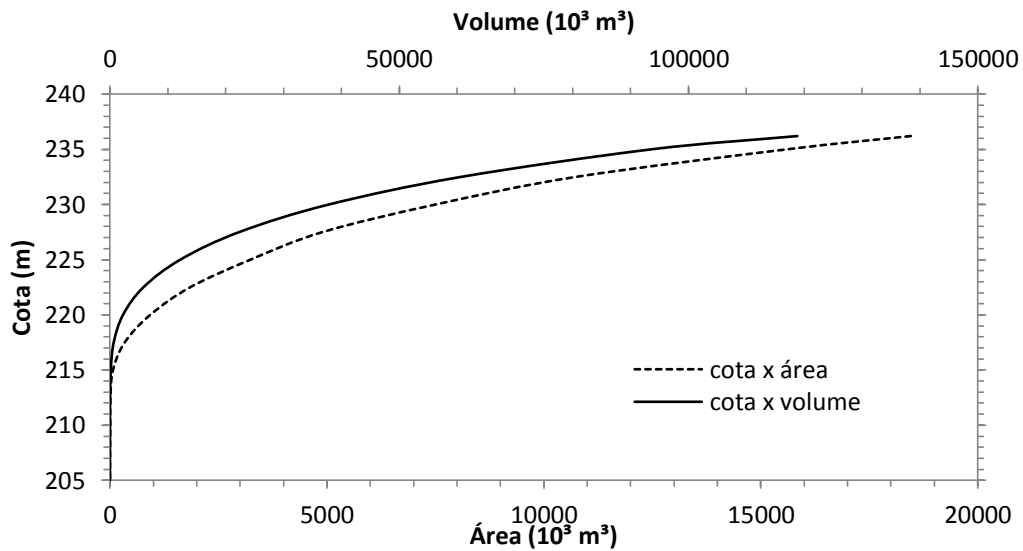


Figura 31 – curva CAV do açude Fogareiro.

4.2.8. Comparação entre os açudes

Dentre os açudes estudados tem-se, em ordem decrescente de volume, e espelhos d'água máximos: Fogareiro, Campina, Riacho Verde, Algodão, Vista Alegre, Lagoa Cercada e Cambito, Na **Tabela 6** estão o volume, a área e a profundidade de cada um deles.

Tabela 6 – Volume máximo, área de espelho d'água máxima e a profundidade máxima encontradas para cada açude.

Açude	Volume (máx.) [m ³]	Área (máx.) [m ²]	Profundidade (máx.) [m]
Fogareiro	1,19E+08	1,85E+07	31,20
Campina	4,03E+06	1,19E+06	11,36
Riacho Verde	5,63E+06	8,80E+05	16,03
Algodão	1,98E+06	3,20E+05	14,00
Vista Alegre	8,33E+05	2,95E+05	8,98
Lagoa Cercada	6,55E+05	2,53E+05	6,67
Cambito	6,26E+05	1,94E+05	9,15

. Dos açudes estudados por BURTE (2008) os únicos passíveis de comparação com o presente trabalho são os açudes do Riacho Verde, Cambito (Na

tese o chama de “Jardim”) e o açude Lagoa Cercada. Observa-se que, nos três açudes, o volume encontrado por BURTE (2008) superestimou o volume real encontrado através da batimetria refinada (**Tabela 7**); também houve pequenas diferenças entre os espelhos máximos d’água encontrados (**Tabela 7**); essa diferença já era esperada, uma vez que o autor em sua tese utilizou imagens do satélite SPOT 5 que tem resolução espacial de 5 m e no presente trabalho foi utilizado, para o contorno do espelho d’água máximo do reservatório, imagens do satélite LANDSAT 5, de resolução espacial igual a 30 m. Contudo, acredita-se que a grande diferença encontrada entre os espelhos d’água do açude Lagoa Cercada não é devido a diferença nas resoluções das imagens utilizadas. Acredita-se que BURTE (2008) em seu trabalho considerou dois pequenos reservatórios construídos na afluência do açude como fazendo parte do mesmo. Também se pôde notar que quanto menor a relação Volume-Área (para o volume e a área encontrados nesse trabalho), maior era a diferença encontrada entre os volumes estimados por BURTE (2008) e os volumes encontrados nesse trabalho, **Tabela 7**.

Tabela 7 – Área e Volume encontrados neste trabalho e estimados por BURTE (2008). V_b , V_j e A_j são, respectivamente, o volume máximo encontrado por BURTE (2008), o volume encontrado nesse trabalho e a área máxima encontrada nesse trabalho.

Açude	Área (m ²) (BURTE, 2008)	Volume (m ³) (BURTE, 2008)	$\left(\frac{V_b - V_j}{V_b}\right) \times 100(\%)$	$\frac{V_j}{A_j}$ (m)
Riacho Verde	$8,0 \cdot 10^5$	$6,70 \cdot 10^6$	16	6,39
Lagoa Cercada	$3,1 \cdot 10^5$	$1,30 \cdot 10^6$	50	2,57
Cambito	$1,8 \cdot 10^5$	$9,70 \cdot 10^5$	36	3,21

Na **Tabela 7** as variáveis V_b , V_j e A_j são, respectivamente, o volume máximo encontrado por BURTE (2008), o volume máximo encontrado no trabalho de batimetria refinado e área máxima da bacia hidráulica encontrada com as imagens LANDSAT 5.

4.3. Modelagem da geometria dos açudes

4.3.1. Otimização dos parâmetros geomorfológicos e análise de seus perfis transversais

4.3.1.1. Açude do Cambito

A **Tabela 8** mostra a relação dos métodos e os valores de α e K encontrados durante a otimização para o açude do Cambito, a otimização foi feita seguindo a metodologia proposta. O índice “v” nos parâmetros corresponde a otimização realizada para a relação V x H (volume/profundidade), o índice “a” corresponde aos valores dos parâmetros obtidos otimizando a relação A x H (área/profundidade) e o índice axv corresponde a otimização utilizando como função objetivo FO(relação ponderada).

Tabela 8 - Métodos de otimização utilizados e parâmetros obtidos durante a otimização para o açude do Cambito.

Métodos	(α_v , K_v)	(α_a , K_a)	(α_{axv} , K_{axv})
NelderMead	(2,516, 2386,10)	(2,576, 2108,39)	(2,576, 2110,12)
RandomSearch	(2,516, 2386,12)	(2,576, 2107,99)	(2,576, 2110,13)
DifferentialEvolution	(2,516, 2385,36)	(2,576, 2107,99)	(2,576, 2110,37)
SimulatedAnnealing	(2,516, 2386,16)	(2,576, 2107,99)	(2,898, 1053,52)

A **Tabela 8** apresenta os melhores valores ótimos de α e K encontrados durante a otimização para cada um dos quatro métodos; através dessa metodologia fica clara a diferença entre otimizar os parâmetros focando a relação V x H e focando a relação A x H. No parâmetro mais sensível, α , a diferença é de até 1%. Esse valor, apesar de parecer irrisório, gera erros enormes, devido a sensibilidade do modelo geométrico à variação do parâmetro. A **Tabela 8** mostra que a função objetivo ponderada tende a privilegiar a relação que obteve piores valores de NSE no ajuste, a relação volume/profundidade produziu melhores valores de NSE do que a relação área/profundidade para todos os métodos de otimização empregados. Nos valores de α foram utilizadas três casas decimais para a precisão; ela é importante, uma vez que um erro de 1% no valor desse parâmetro pode ocasionar um afastamento do resultado correto de até 700%. Portanto, decidiu-se utilizar essa precisão para evitar maiores erros no resultado, uma vez que a terceira casa decimal tem a mesma ordem de grandeza de 0,1% do valor do parâmetro α .

Na **Tabela 8** é possível perceber que otimizando a relação volume/profundidade, otimizando a relação área/profundida ou otimizando a relação ponderada, os valores de α , até a terceira casa decimal, coincidem (salvo para o método Simulated Annealing, para a função objetivo FO), mostrando que os métodos se equivalem no que tange a otimização desse parâmetro. A diferença aparece nos valores de K. Dos métodos utilizados para a relação volume/profundidade o que apresentou melhor valor de NSE, foi o método Nelder-Mead, para a relação área/profundidade o método que produziu melhor valor de NSE foi o método Random Search e para a relação ponderada, o método que apresentou melhor valor de FO foi o método Nelder-Mead. Portanto, para o açude do Cambito o par (α, K) que otimiza as relações volume/profundidade, área/profundidade e a relação ponderada são, respectivamente, (2.516, 2386.10), (2.576, 2107.99) e (2.576, 2110.12). Note que, devido a precisão adotada, há possibilidade de escolher mais de um método de otimização como sendo o melhor para a situação; porém, à medida que aumenta a precisão dos parâmetros, para diminuição do erro, aumenta a necessidade da escolha de um método em detrimento dos outros.

A **Figura 32** mostra uma relação, em várias escalas, de todos os valores possíveis de NSE_A e NSE_V para o açude do Cambito. Apesar de não se tratar de um problema multiobjectivo é possível perceber na **Figura 32** algo semelhante às frentes de Pareto. Esses gráficos mostram que, a priori, pode ser descartada a ideia de que os NSE's encontrados se tratem de mínimos locais, uma vez que os gráficos mostram que os valores não convergem para um único par máximo de NSE_A e NSE_V . Para que os valores de α e K ótimos fossem os mesmos, seja para a otimização da relação volume/profundida ou área/profundidade, deveria haver um ponto único extremo nos gráficos. Também é possível visualizar que os ajustes para a relação Volume/Profundidade, na maioria dos casos, se mostraram melhores que os ajustes para a relação Área/Profundidade.

A **Figura 33** mostra as curvas de ajuste para as variáveis de saída com base na função objetivo FO; é possível perceber um bom ajuste do modelo aos dados medidos. O NSE obtido para ambas as curvas foi de 0,99; nestes gráficos são mostrados os valores modelados seguindo a função objetivo FO.

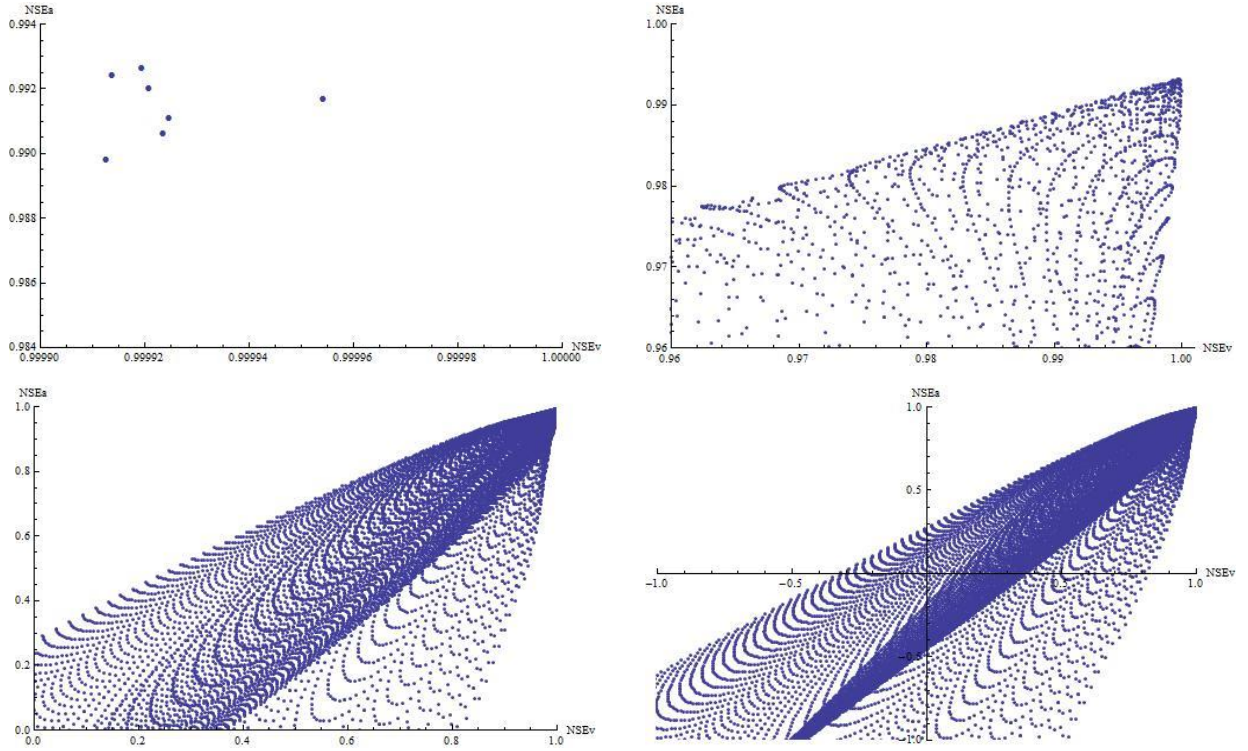


Figura 32 - A figura mostra a relação entre todas as combinações possíveis de NSE's, para o açude do Cambito, em diferentes escalas.

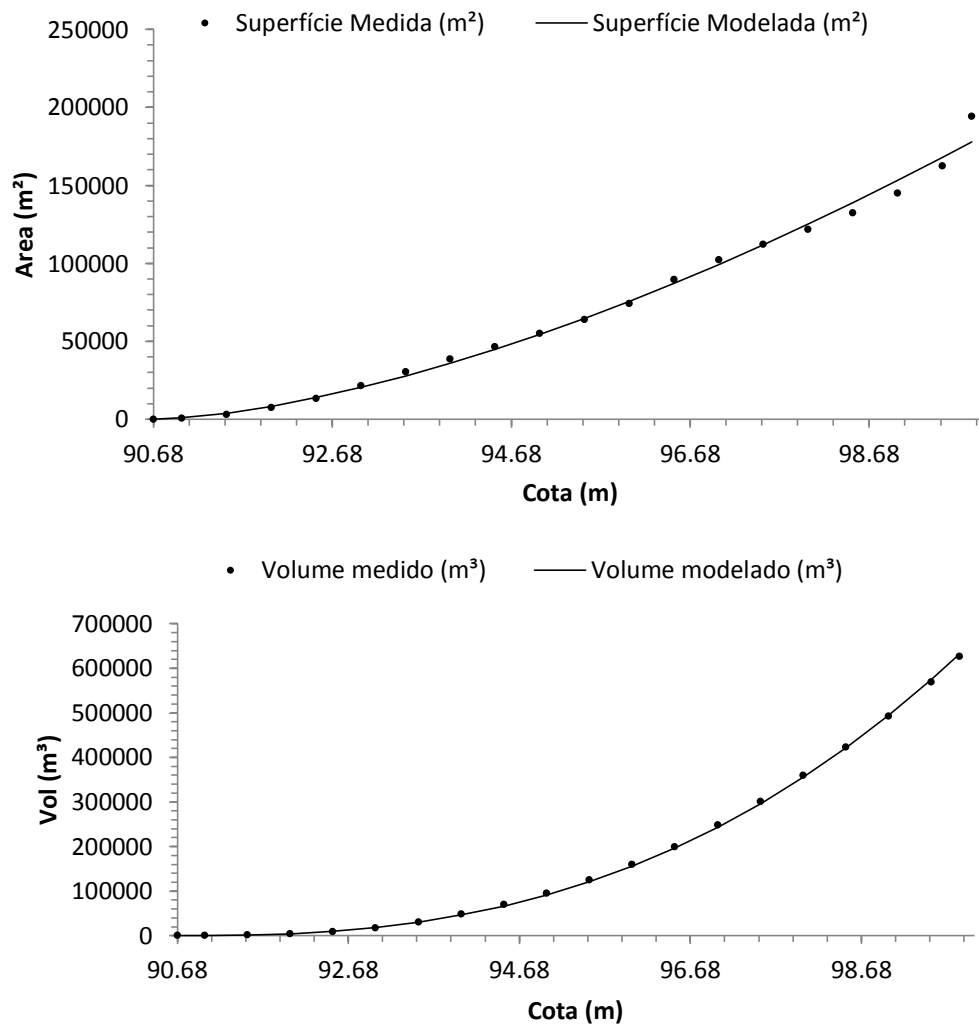


Figura 33 - (a) Ajuste do modelo aos dados medidos para a variável de saída da área. (b) Ajuste para o volume do reservatório.

Os dez perfis na **Figura 34** foram colocados para mostrar um pouco da morfometria do reservatório. Os perfis transversais mostram as irregularidades do fundo do reservatório. Note que à medida que ocorre um afastamento da parede do açude, perfil 1, as encostas vão se tornando mais declivosas pelo estreitamento do vale mais a montante do açude. Logo, é de se esperar que essa heterogeneidade dos perfis transversais, ao longo do reservatório, influenciaram no aumento do valor de α , enquanto que o aumento no relevo, nas partes mais a montante do reservatório, fizeram com que o valor K tivesse valores mais baixos.

O valor de α calibrado para a relação ponderada, 2,576, indica que o açude possui encostas côncavas com leves desvios para o formato de 'v', mostrado na

Figura 34. Já o valor de 'K' obtido para a relação ponderada, 2110,12, indica que o açude tem um relevo ondulado médio com partes planas.

A bacia hidrográfica do açude do Cambito tem uma declividade média de aproximadamente 11° , máxima de $34,91^\circ$ e mínima de $0,17^\circ$. Nos entornos do açude, a declividade se encontra entre 8% e 9% que é uma das maiores encontradas para os reservatórios em estudo. Apesar de concordar parcialmente com o "baixo" valor K (mas ainda acima da média regional), quando comparado com os demais ele não é o menor valor de K do estudo, como era de se esperar da maior declividade.

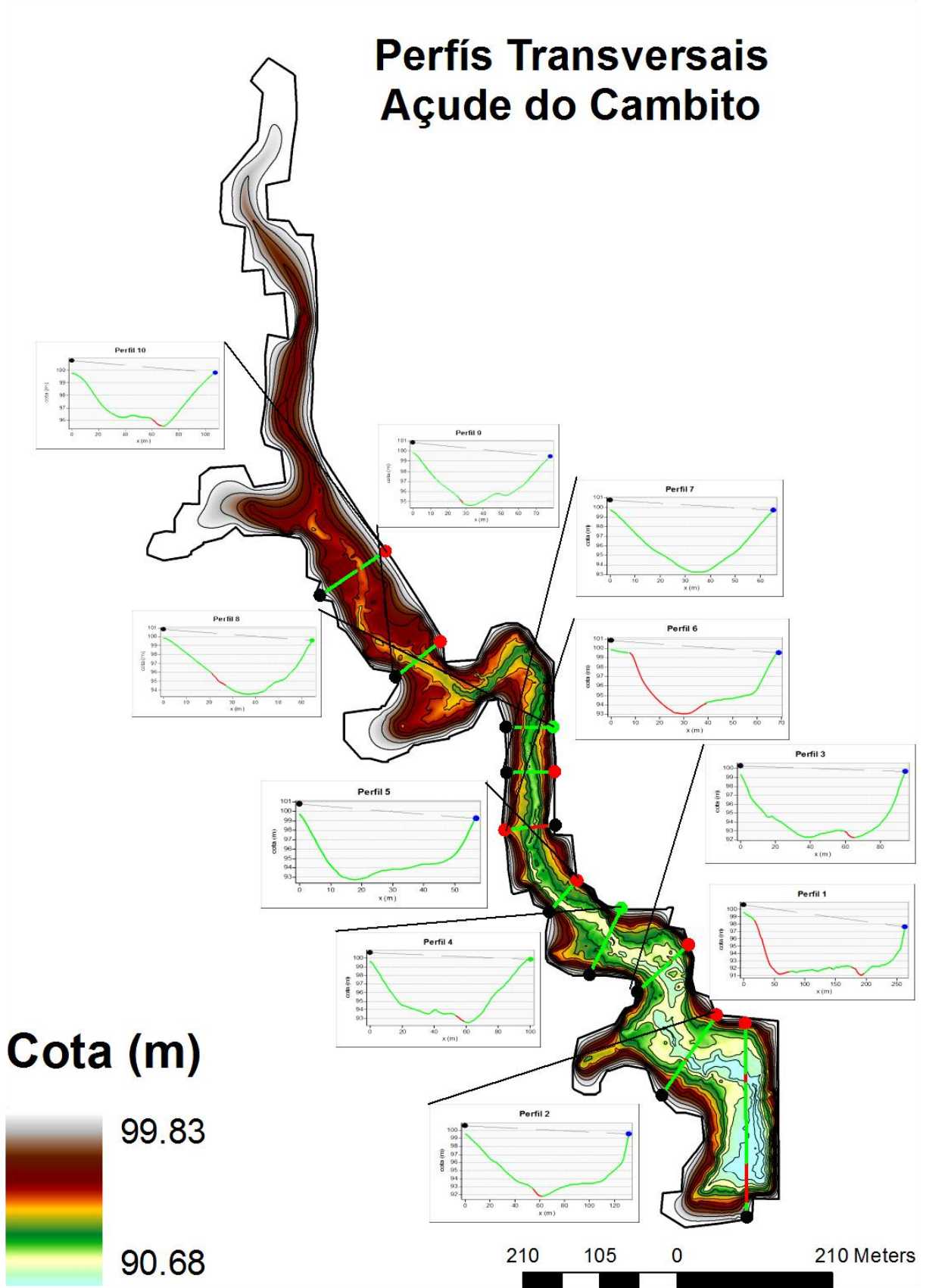


Figura 34 - Perfis transversais do açude do Cambito

4.3.1.2. Açude do Riacho Verde

A **Tabela 9** mostra a relação dos métodos e os valores de α e K encontrados durante a otimização para o açude do Riacho Verde seguindo a metodologia proposta. O índice “v” nos parâmetros corresponde a otimização realizada para a relação $V \times H$ (volume/profundidade), o índice “a” corresponde aos valores dos parâmetros obtidos otimizando a relação $A \times H$ (área/profundidade) e o índice axv corresponde a otimização utilizando como função objetivo FO (relação ponderada).

Tabela 9 - Métodos de otimização utilizados parâmetros obtidos durante a otimização para o açude do Riacho Verde.

Métodos	(α_v , K_v)	(α_a , K_a)	(α_{axv} , K_{axv})
NelderMead	(2,332, 8709,93)	(2,342, 8519,13)	(2,341, 8519,66)
RandomSearch	(2,332, 8709,98)	(2,342, 8519,15)	(2,342, 8515,96)
DifferentialEvolution	(2,332, 8709,41)	(2,342, 8518,86)	(2,342, 8518,35)
SimulatedAnnealing	(2,503, 5626,40)	(2,478, 5882,18)	(2,284, 9999,91)

Na **Tabela 9** é possível perceber que, otimizando a relação volume/profundidade, otimizando a relação área/profundida ou otimizando a relação ponderada, os valores de α , até sua terceira casa decimal, coincidem (salvo para o método Simulated Annealing, para a função objetivo FO) mostrando que os métodos equivalem no que tange à otimização desse parâmetro. A diferença surge nos valores de K . Dos métodos utilizados para a relação volume/profundidade o que apresentou melhor valor de NSE foi o Nelder-Mead, para a relação área/profundidade, o método que produziu melhor valor de NSE também foi o método Nelder-Mead e, para a relação ponderada, o método que apresentou melhor valor de FO foi o método Random Search. Portanto, para o açude do Cambito o par (α , K) que otimiza as relações volume/profundidade, área/profundidade e a relação ponderada são, respectivamente, (2,332, 8709,93), (2,342, 8519,13) e (2,342, 8515,96). Note que devido a precisão adotada há a possibilidade de escolher mais de um método de otimização como o melhor para a situação. Porém, à medida que aumenta a precisão dos parâmetros, para a diminuição do erro, aumenta a necessidade da escolha de um método em detrimento dos outros. Os valores dos

parâmetros diferiram pouco, o que presume uma inércia de classes para o açude, seja qual for a relação utilizada na otimização.

A **Figura 35** mostra os gráficos gerados para todos os possíveis valores de NSE. É possível perceber claramente que os pares máximos de valores de NSE não coincidem. O valor máximo de NSEa obtido quando se otimiza a relação V-H não coincide com o NSEa obtido quando se otimiza a relação S-H. Isso é facilmente observado quando se analisa os extremos dos gráficos.

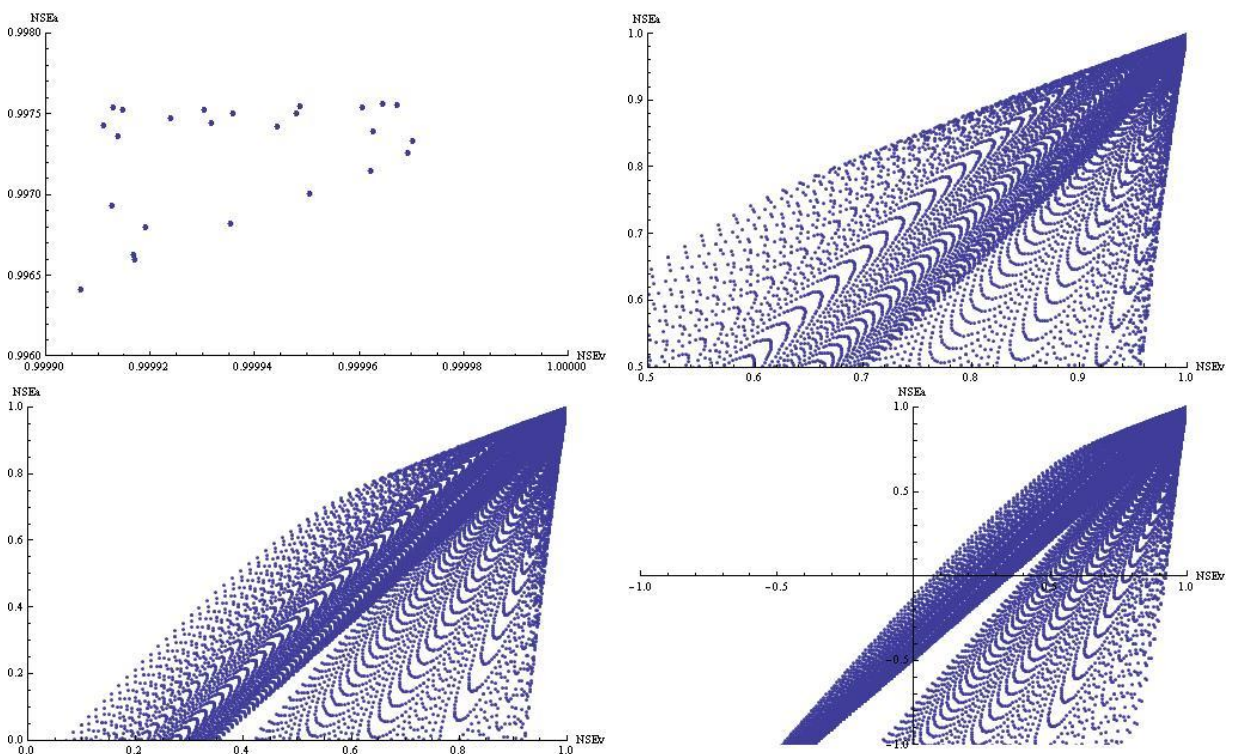


Figura 35 – Relação entre todas as combinações possíveis de NSE's, para o açude do Riacho Verde, em diferentes escalas.

A **Figura 36** mostra as curvas de ajuste para as variáveis de saída para os valores ótimos de α e K obtidos utilizando a função objetivo FO. O ajuste se mostrou muito bom, seja para a relação V-H ou para a relação S-H; somente para a relação S-H que houve um pequeno desvio no valor máximo da área. O modelo pareceu subestimar o valor máximo da área; BURTE (2008) encontrou um valor menor de área máxima do que o encontrado nesse trabalho para o açude do Riacho Verde; validando o valor de área máxima encontrado nesse trabalho.

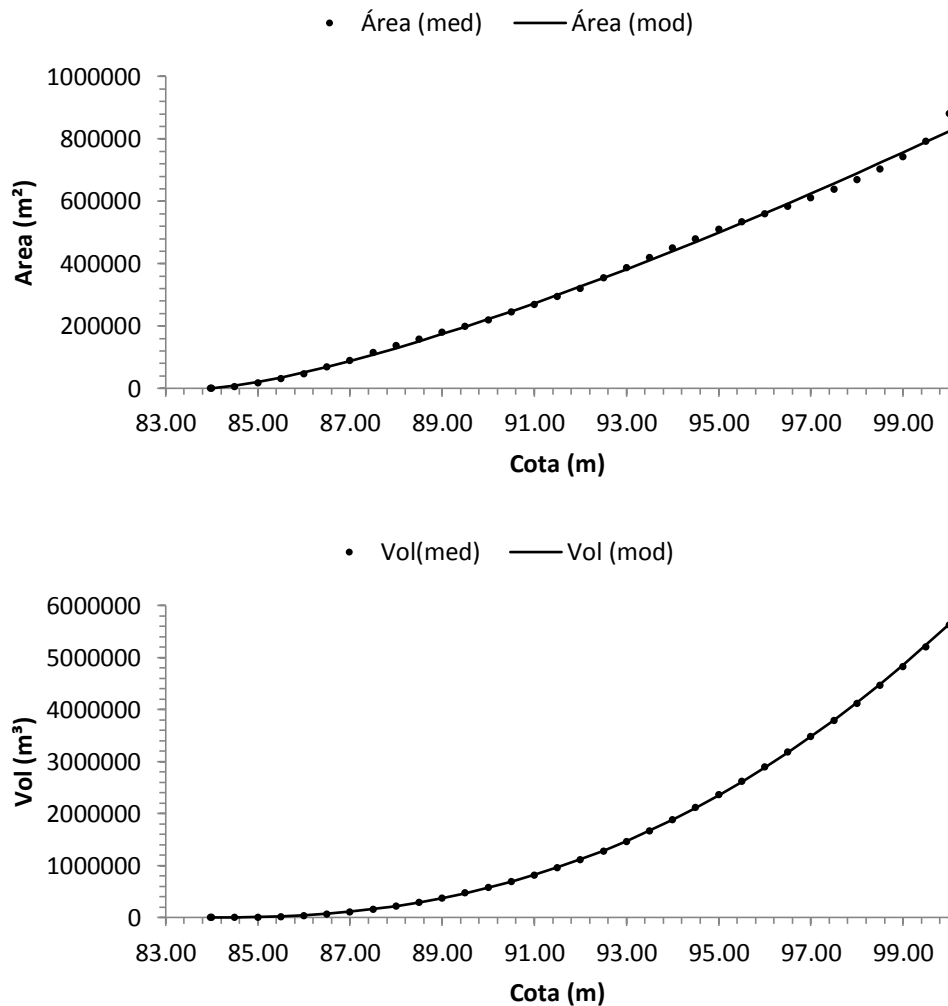


Figura 36-(a) Ajuste do modelo aos dados medidos para a variável de saída da área. (b) Ajuste para o volume do reservatório.

Os perfis transversais na **FIGURA 37** mostram claramente a natureza côncava das encostas do reservatório que é percebida em quase todos os perfis que corrobora com o baixo valor de α encontrado durante a otimização. O valor de K encontrado é característico de grandes espelhos, vales abertos e planos, concordando com o valor encontrado.

A bacia do açude do Riacho Verde tem declividade média de $5,3^\circ$, máxima de $28,38^\circ$ e mínima de $0,09^\circ$, nos entornos do açude, a declividade fica em torno de 6,24 %, um valor baixo, como esperado para altos valores de K.



Perfis transversais Açude do Riacho Verde

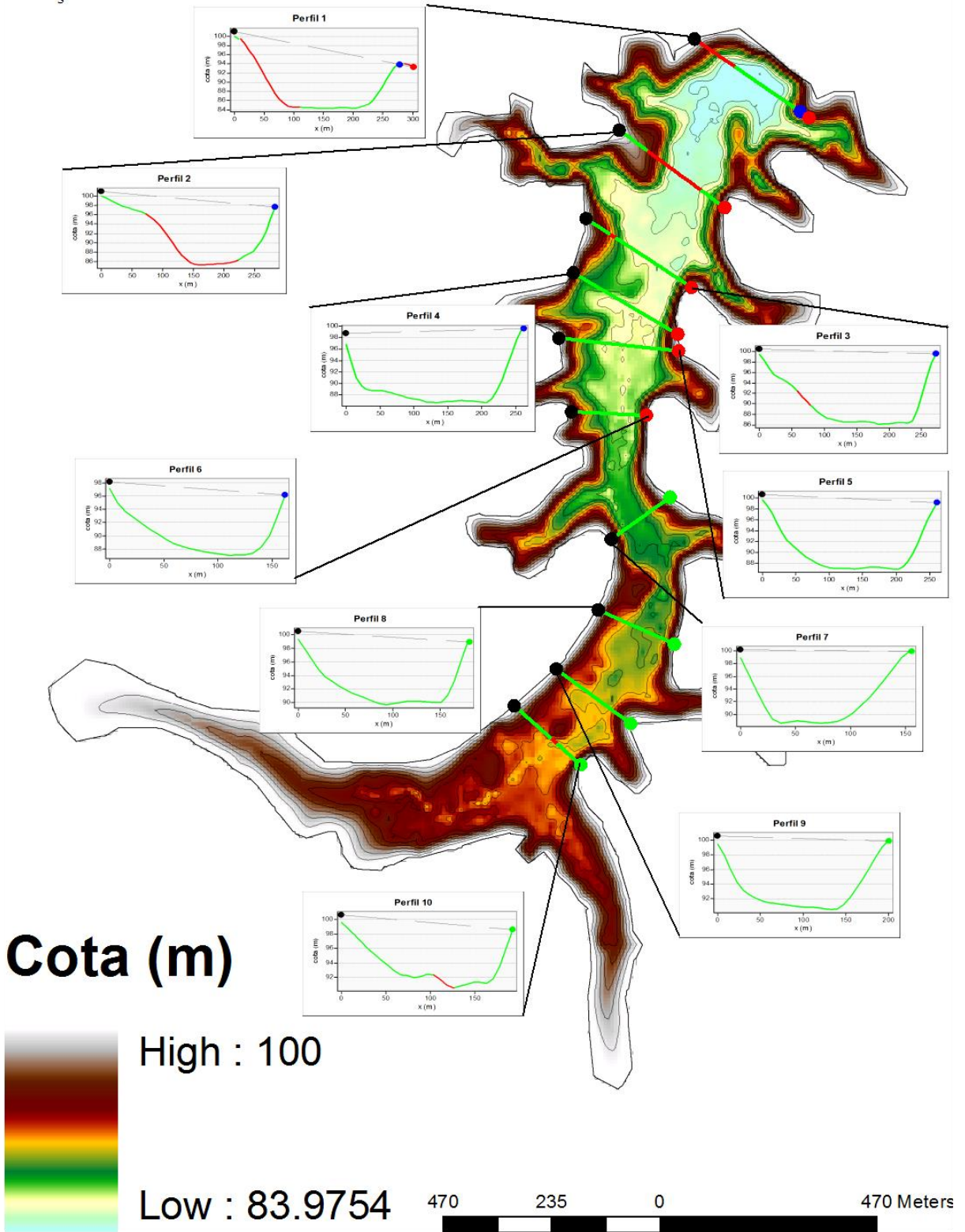


Figura 37- Perfis transversais do açude do Riacho Verde

4.3.1.3. Açude da Lagoa Cercada

A **Tabela 10** mostra a relação dos métodos e os valores de α e K encontrados durante a otimização para o açude da Lagoa Cercada; a otimização foi feita seguindo a metodologia proposta. O índice “v” nos parâmetros corresponde a otimização da relação $V \times H$ (volume/profundidade), o índice “a” aos valores dos parâmetros obtidos otimizando a relação $A \times H$ (área/profundidade) e o índice axv à otimização utilizando como função objetivo FO (relação ponderada).

Tabela 10 - Métodos de otimização utilizados e os respectivos valores das funções objetivo encontrados para o açude da Lagoa Cercada.

Métodos	(α_v , K_v)	(α_a , K_a)	(α_{axv} , K_{axv})
NelderMead	(2,314, 8146,54)	(2,35, 7693,86)	(2,351, 7685,05)
RandomSearch	(2,314, 8146,49)	(2,35, 7693,86)	(2,351, 7685,09)
DifferentialEvolution	(2,317, 8106,61)	(2,35, 7689,97)	(2,351, 7685,88)
SimulatedAnnealing	(2,206, 10000)	(2,205, 10000)	(2,441, 6098,22)

Diferente dos dois açudes analisados antes, o reservatório da Lagoa Cercada apresentou a maior variação nos valores de α , entre os métodos somente para a relação volume/profundidade. Nas demais relações é observada a mesma tendência dos açudes discutidos até agora. O método que apresentou o maior valor de NSE para a relação Volume-Profundidade foi o Random Search, para a relação Área-Profundidade o melhor valor encontrado foi pelo método Nelder-Mead. Para a relação ponderada, onde se minimiza a função objetivo FO, o método com melhor ajuste foi o método Random Search. Os pares (α , K) adotados para as relações volume/profundidade, área/profundidade e a relação ponderada foram, respectivamente, (2,314, 8146,49), (2,35, 7693,86) e (2,351, 7685,09). Os valores de α e K entre as relações são muito próximos, porém, devido à alta sensibilidade do modelo, a variação dos parâmetros, as diferenças são perceptíveis.

A **Figura 38** mostra os gráficos gerados para todos os possíveis valores de NSE, onde observa-se que os pares máximos de valores de NSE não coincidem. O valor máximo de NSEa obtido quando se otimiza a relação V-H não coincide com o

NSEa obtido quando se otimiza a relação S-H, facilmente observado quando se analisa os extremos dos gráficos.

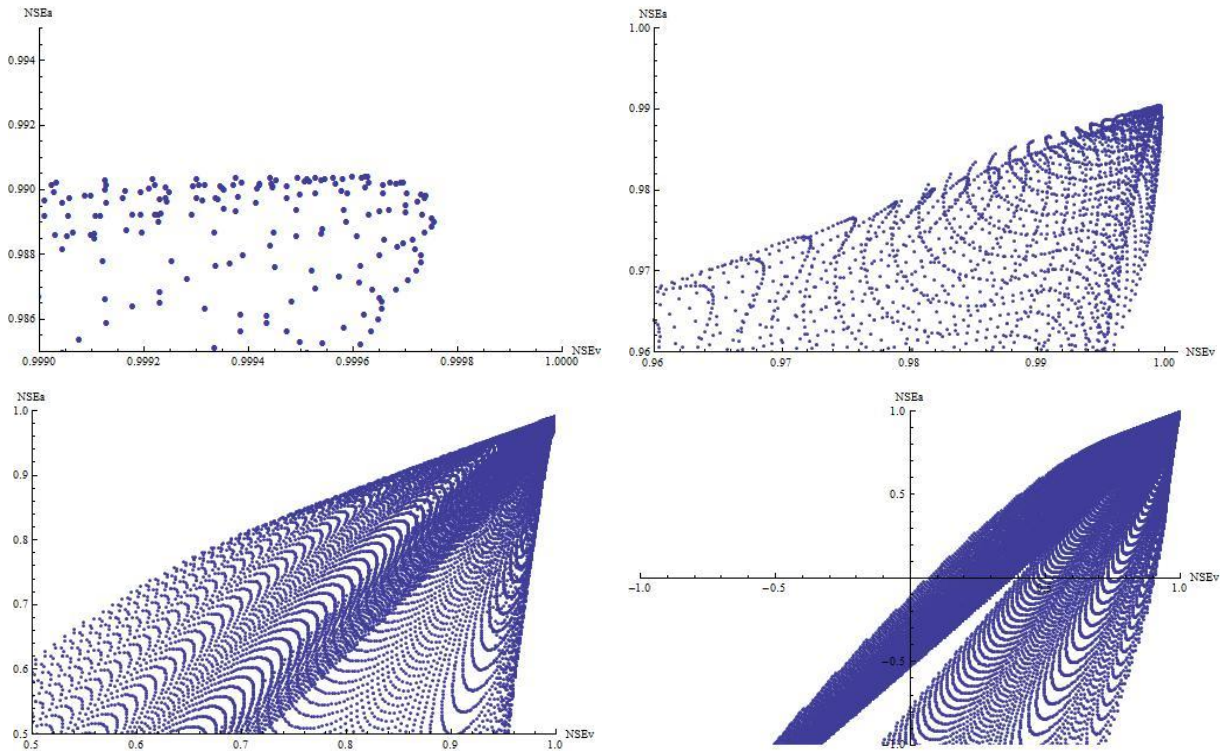


Figura 38 – A figura mostra a relação entre todas as combinações possíveis de NSE's, para o açude da Lagoa Cercada, em diferentes escalas.

A **Figura 39** mostra as curvas de ajuste para as variáveis de saída com o ajuste utilizando a função objetivo FO. É possível perceber que o ajuste diminui à medida que a cota aumenta, no caso da **Figura 39(a)**. O ajuste da curva cota-área não é tão bom quanto o ajuste da curva cota-volume, ora a área é subestimada, ora é superestimada, dada as condições em que ocorreu a batimetria (açude muito abaixo do seu nível de sangria). Contudo, os erros são pequenos para os valores de cota utilizados nesse trabalho e só deverão ocorrer para valores de cotas maiores.

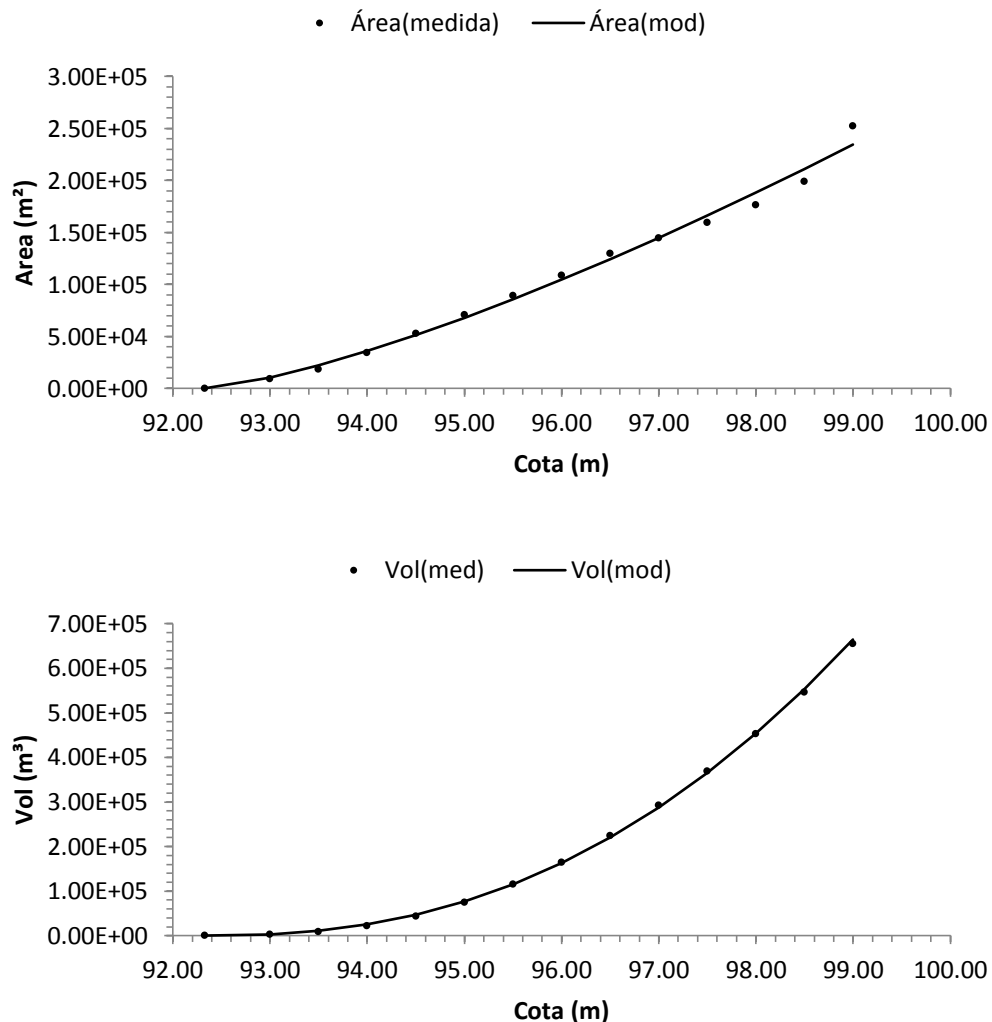


Figura 39-(a) Gráfico que mostra o ajuste do modelo com os dados medidos para a variável de saída área. **(b)** mostra o ajuste para o volume do reservatório.

O baixo valor encontrado para o parâmetro α indica que o açude tem encostas côncavas o que é verificado nos perfis transversais traçados na **Figura 40**. O perfil de encostas côncavas é mais expressivo nas partes que mais se aproximam da parede do reservatório e o perfil em forma de “v” é pouco expressivo quando se observa o conjunto de perfis. O valor do parâmetro K sugere um vale aberto, com baixa declividade nos arredores do reservatório o que é verificado de forma satisfatória nos arredores do reservatório, com base na declividade da bacia.

A bacia do açude Lagoa Cercada tem declividade média de $3,76^\circ$, máxima de $21,75^\circ$ e mínima de $0,09^\circ$; nos entornos do açude a declividade fica em torno de 4,40%, concordando com o valor de ‘K’ calibrado. Apesar de não ter o mesmo porte

do açude do Riacho Verde o açude Lagoa Cercada tem características geomorfológicas muito semelhantes a ele.

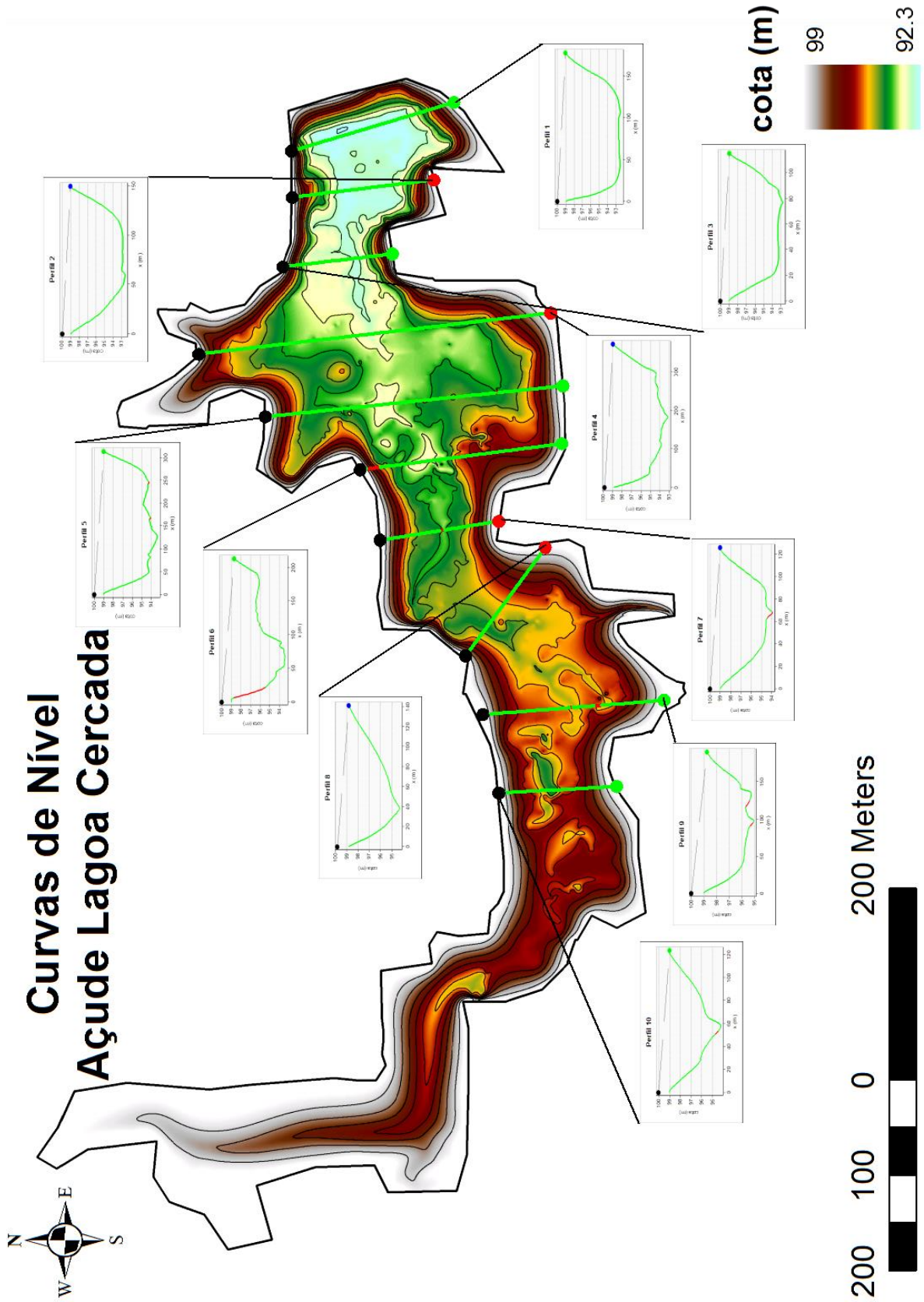


Figura 40- Perfis transversais do açude Lagoa Cercada.

4.3.1.4. Açude da Vista Alegre

A **Tabela 11** mostra a relação dos métodos e os valores de α e K encontrados durante a otimização para o açude da Vista Alegre feita seguindo a metodologia proposta. O índice “v” nos parâmetros corresponde a otimização realizada para a relação $V \times H$ (volume/profundidade), o índice “a” aos valores dos parâmetros obtidos otimizando a relação $A \times H$ (área/profundidade) e o índice axv à otimização da função objetivo FO (relação ponderada).

Tabela 11 - Métodos de otimização utilizados e os respectivos valores das funções objetivo encontrados para o açude da Vista Alegre.

Métodos	(α_v, K_v)	(α_a, K_a)	(α_{axv}, K_{axv})
NelderMead	(2,812, 1748,06)	(2,834, 1682,98)	(2,836, 1676,71)
RandomSearch	(2,812, 1748,06)	(2,834, 1682,99)	(2,836, 1676,72)
DifferentialEvolution	(2,789, 1839,04)	(2,834, 1682,99)	(2,836, 1676,72)
SimulatedAnnealing	(2,729, 2201,76)	(2,729, 2201,76)	(2,729, 2201,76)

O reservatório da Vista Alegre apresentou os valores mais baixos de K dentre os açudes estudados até aqui. Da mesma forma que o reservatório da Lagoa Cercada, esse açude mostrou diferenças entre os valores dos parâmetros ótimos obtidos por cada um dos métodos, principalmente na relação volume/profundidade. Nas demais relações é observado a mesma tendência.

Dentre os métodos de otimização mostrados na **Tabela 11** o que apresentou melhores valores de NSE para a relação volume/profundidade foi o método Random Search, para a relação área/profundidade o método que maximiza o valor de NSE é o método Nelder-Mead que é o mesmo ocorre para a relação ponderada. Os pares ótimos (α, K) , obtidos para as relações volume/profundidade, área/profundidade e a relação ponderada são, respectivamente, (2,812, 1748,06), (2,834, 1682,98) e (2,836, 1676,71).

A **Figura 41** com os gráficos gerados para todos os possíveis valores de NSE mostra claramente que os pares máximos de valores de NSE não coincidem. O valor máximo de NSEa obtido quando se otimiza a relação V-H não coincide com o

NSEa obtido quando se otimiza a relação S-H observado claramente quando se analisa os extremos dos gráficos.

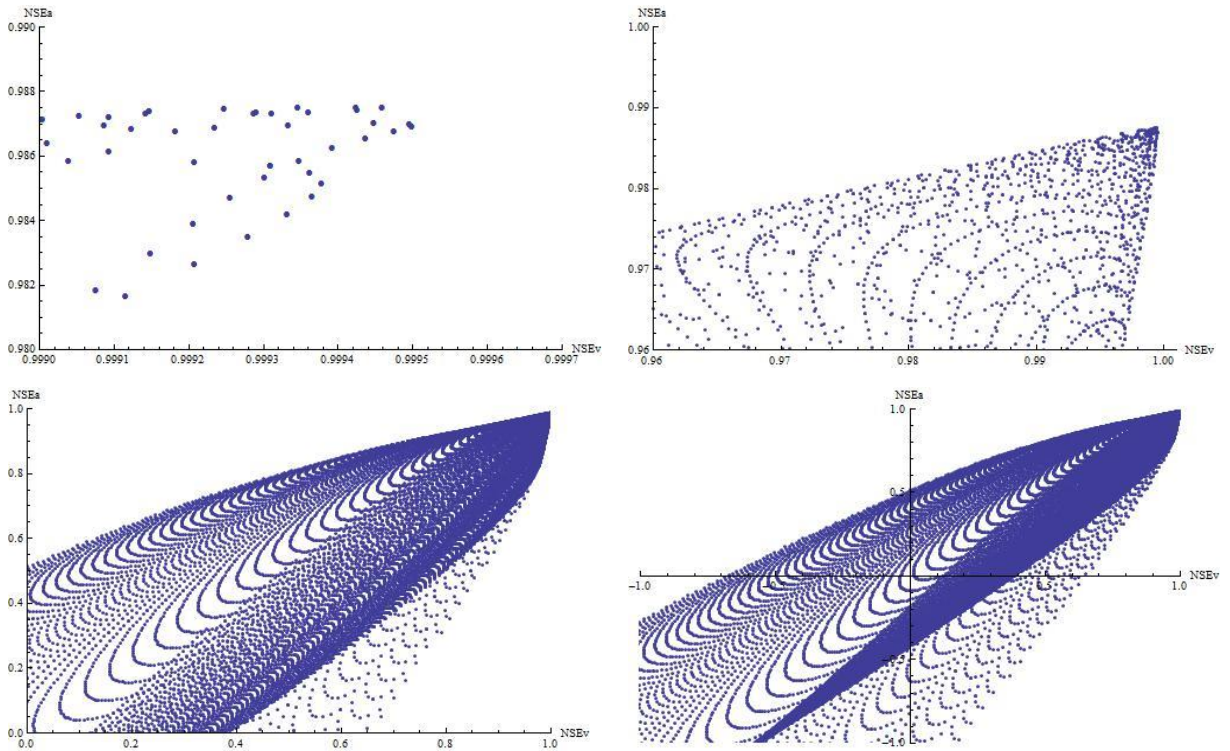


Figura 41 - Relação entre todas as combinações possíveis de NSE's, para o açude da Vista Alegre, em diferentes escalas.

A **Figura 42** mostra as curvas de ajuste para as variáveis de saída do par ótimo (a, K) obtido utilizando a função objetivo FO. A curva da **Figura 42(b)** mostra que o modelo passa a não responder tão bem à partir da cota 97,72 m pelas condições em que foi feita a batimetria (açude com 2,08 m abaixo do seu nível de sangria), algo que exigiu uma extrapolação dos resultados durante a interpolação dos dados.

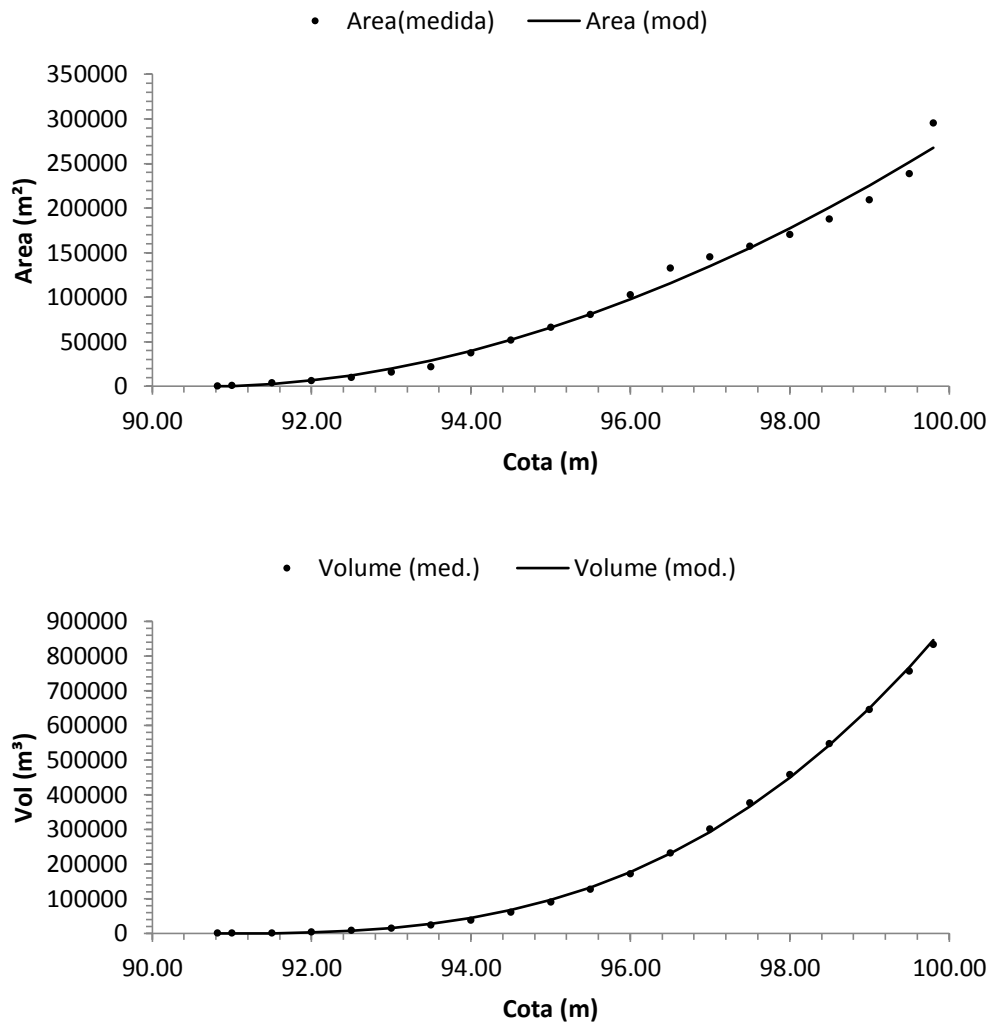


Figura 42 - (a) Ajuste do modelo com os dados medidos para a variável de saída da área. (b) Ajuste para o volume do reservatório.

Dentre os açudes estudados, o açude da Vista Alegre foi o que apresentou a maior irregularidade nos perfis (**Figura 43**), mas apesar disso é possível verificar que o reservatório possui encostas côncavas, o que sugere um baixo valor de α não foi encontrado. O valor de α encontrado é típico de reservatórios em formato de “v”, com encostas menos côncavas, indicando que para esse reservatório em particular, apesar do bom ajuste da curva CAV, somente esse parâmetro não consegue descrever bem a forma das encostas do reservatório. Com o parâmetro K ocorre o mesmo; nos entornos da bacia hidráulica do reservatório a declividade fica em torno de 5%, o que não condiz com o baixo valor de K . Logo, o modelo de MOLLE (1994) parece não explicar a geometria desse reservatório em particular.

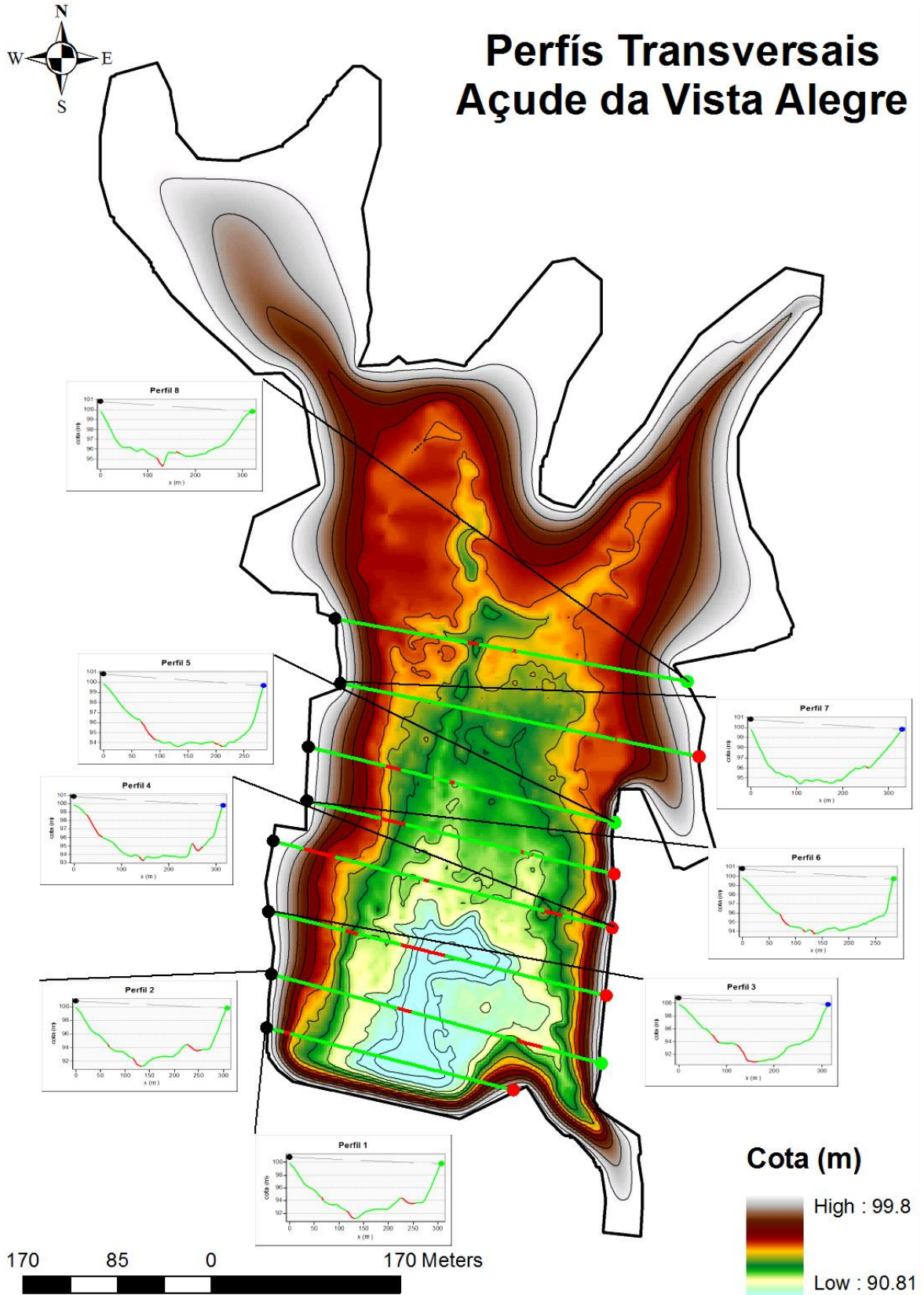


Figura 43- Perfis transversais do açude da Vista Alegre.

4.3.1.5. Açude da Campina

A **Tabela 12** mostra a relação dos métodos e os valores de α e K encontrados durante a otimização para o açude da Campina feita seguindo a metodologia proposta. O índice “v” nos parâmetros corresponde a otimização realizada para a relação V x H (volume/profundidade), o índice “a” aos valores dos parâmetros obtidos otimizando a relação A x H (área/profundidade) e o índice axv à otimização utilizando como função objetivo FO (relação ponderada).

Tabela 12 - Métodos de otimização utilizados e os respectivos valores das funções objetivo encontrados para o açude da Lagoa Cercada.

Métodos	(α_v , K_v)	(α_a , K_a)	(α_{axv} , K_{axv})
NelderMead	(3,042, 2524,98)	(2,944, 3246,14)	(2,965, 3073,25)
RandomSearch	(3,042, 2524,56)	(2,944, 3246,15)	(2,965, 3073,27)
DifferentialEvolution	(3,042, 2525,79)	(2,944, 3249,05)	(2,946, 3204,53)
SimulatedAnnealing	(2,714, 5053,98)	(2,437, 9999,93)	(2,894, 3776,45)

O açude da Campina apresentou os valores mais altos de α dentre os açudes estudados; os valores ótimos encontrados para os parâmetros variam pouco. A diferença entre os valores ótimos para a relação volume/profundidade e os valores ótimos para a relação área/profundidade são muito próximos.

Dentre os métodos utilizados para otimizar os parâmetros, o Random Search produziu melhor resultado para a relação volume/profundidade enquanto que para as demais relações o método Nelder-Mead foi o de melhores resultados. Os valores ótimos dos pares (α , K) para as relações V x H, A x H e V x H x A são, respectivamente, (3,042, 2524,56), (2,944, 3246,14) e (2,965, 3073,25).

A **Figura 44** com os gráficos gerados para todos os possíveis valores de NSE mostra claramente que os pares máximos de valores de NSE não coincidem, o valor máximo de NSEa quando se otimiza a relação V-H não coincide com o NSEa obtido quando se otimiza a relação S-H, o que é facilmente observado quando se analisa os extremos dos gráficos.

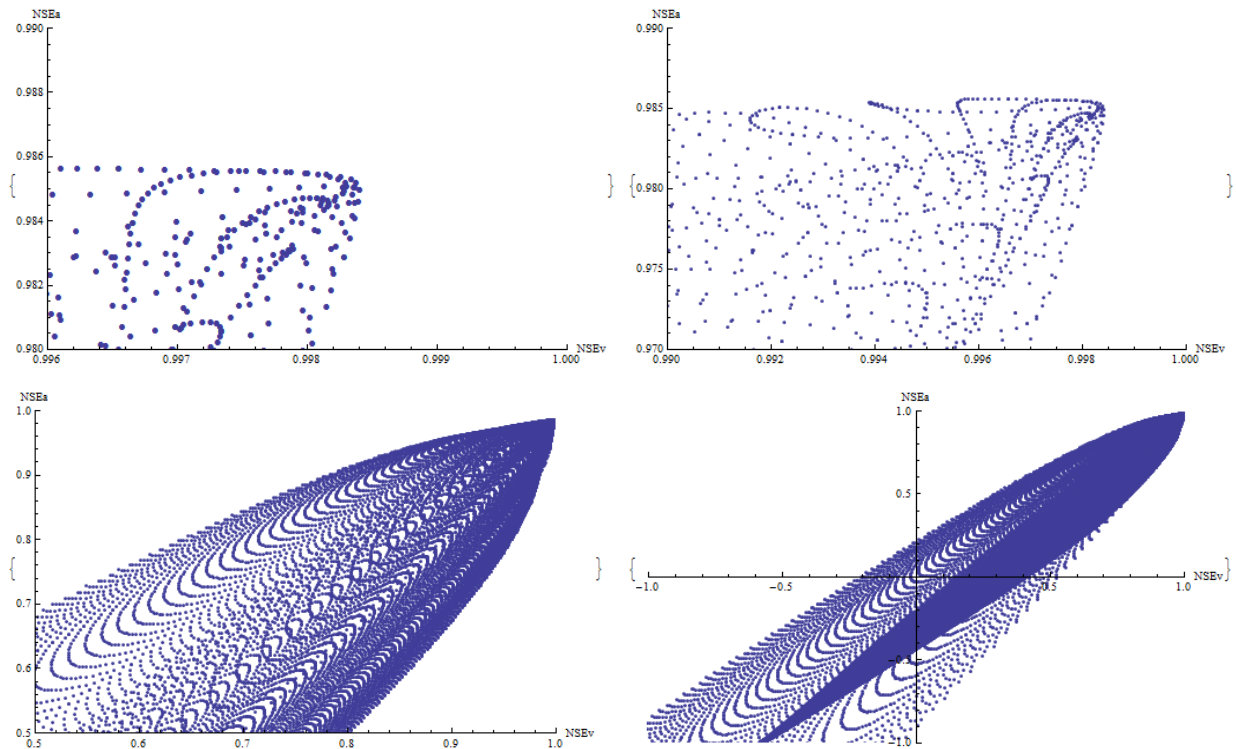


Figura 44 - Relação entre todas as combinações possíveis de NSE's, para o açude da Campina, em diferentes escalas.

As curvas CAV ajustadas na **Figura 45**, segundo os valores ótimos encontrados utilizando a função objetivo FO, tem 0,99 alto valor de NSE, mas, para a curva Volume x Cota, os valores mais baixos de cota tiveram seus valores superestimados, enquanto para cotas mais elevadas, o ajuste foi melhor. Para a curva Superfície x Cota, o ajuste ora superestima os valores de área, ora subestima.

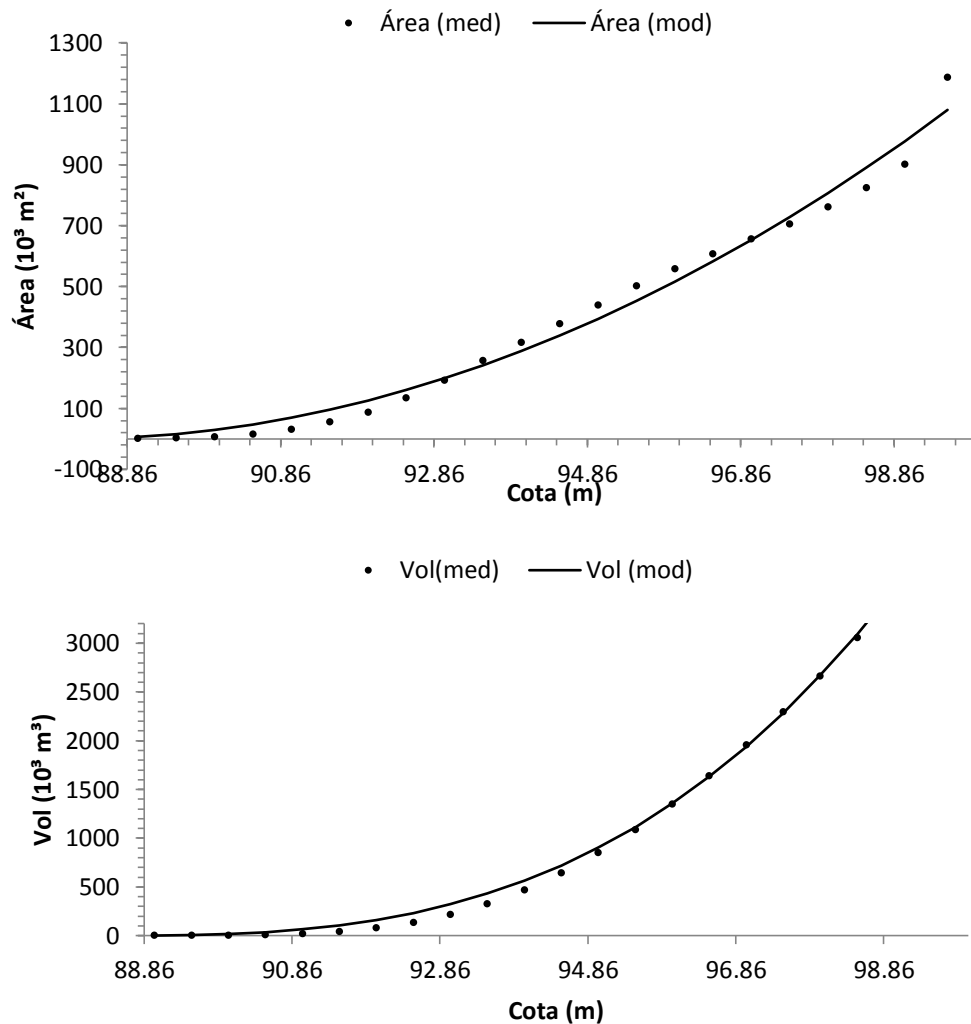
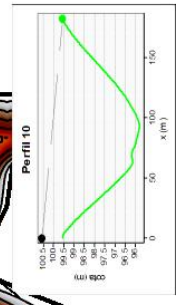
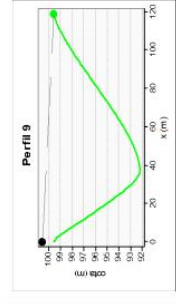
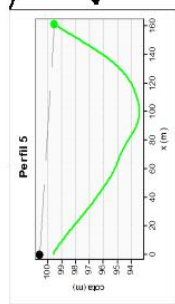
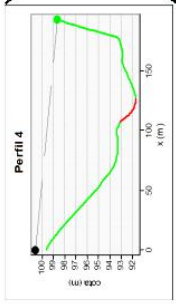
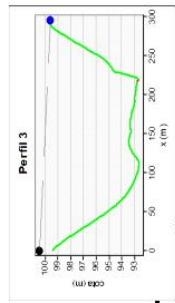
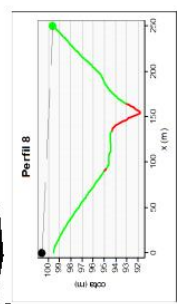
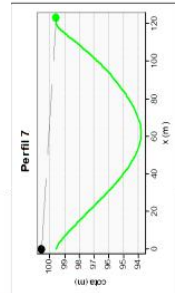
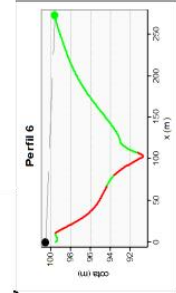
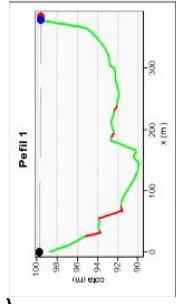
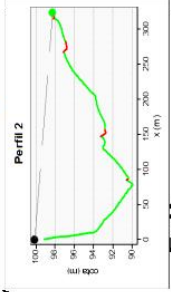
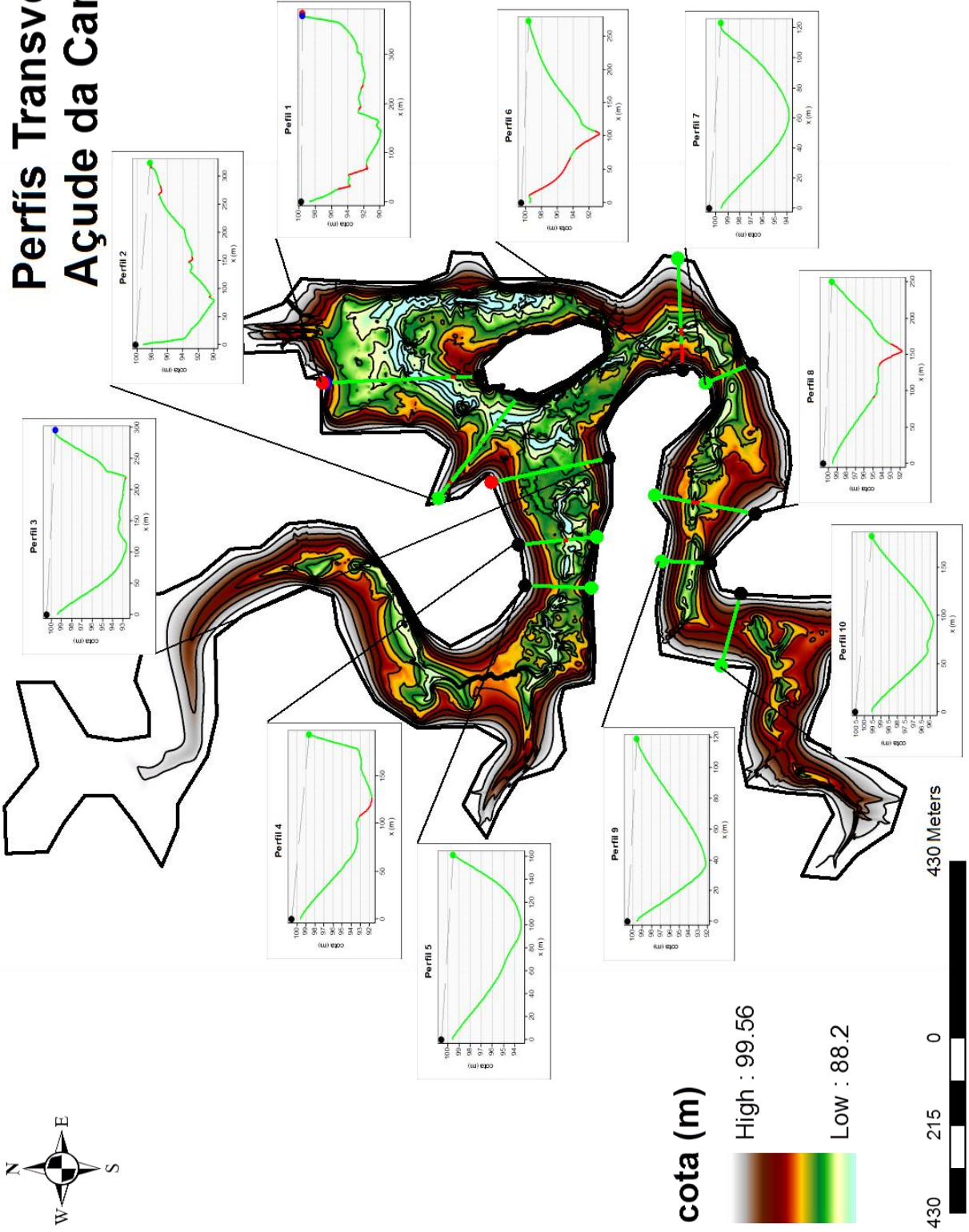


Figura 45 - (a) Ajuste do modelo com os dados medidos para a variável de saída da área. (b) Ajuste para o volume do reservatório.

Os perfis observados na **Figura 46** mostram encostas menos côncavas do que as observadas nos demais açudes o que concorda com o alto valor do parâmetro α encontrado durante o processo de otimização, o parâmetro K é típico de relevos menos ondulados. O relevo dos arredores do açude tem declividade de 3,9%, mas este baixo valor não consegue explicar o valor de K , pois foram encontrados valores declividade maiores do que esse para K maiores (açude do Riacho Verde), o que não representa a realidade física do modelo geométrico.

Perfis Transversais Açude da Campina



4.3.1.6. Açude do Algodão

A **Tabela 13** mostra a relação dos métodos e os valores de α e K encontrados durante a otimização para o açude do Algodão feita seguindo a metodologia proposta. O índice “v” nos parâmetros a otimização realizada para a relação V x H (volume/profundidade), o índice “a” aos valores dos parâmetros obtidos otimizando a relação A x H (área/profundidade) e o índice axv à otimização utilizando como função objetivo FO (relação ponderada).

Tabela 13 - Métodos de otimização utilizados e os respectivos valores das funções objetivo encontrados para o açude da Lagoa Cercada.

Métodos	(α_v, K_v)	(α_a, K_a)	(α_{axv}, K_{axv})
NelderMead	(2,376, 3756,36)	(2,474, 2640,93)	(2,371, 3629,22)
RandomSearch	(2,376, 3756,52)	(2,474, 2640,94)	(2,371, 3629,22)
DifferentialEvolution	(2,367, 3851,29)	(2,471, 2661,65)	(2,371, 3629,53)
SimulatedAnnealing	(2,303, 4498,67)	(2,539, 2124,11)	(2,259, 4993,01)

O reservatório do Algodão não passou por um processo de batimetria como os outros reservatórios, portanto, os valores de α e K obtidos nesse estudo são os valores ajustados utilizando as curvas do projeto de construção.

Os valores do par (α, K) mostraram variabilidade alta, quando comparados com os demais reservatórios, mas a variabilidade chega a ponto de mudar a classificação do tipo da geometria do açude com base nos seus parâmetros. Para a relação volume/profundidade o método que mostrou melhor resultado durante o processo de otimização foi o método Random Search e para as demais relações, os melhores valores encontrados foram utilizando o método Nelder-Mead. Os valores ótimos encontrados para as relações volume/profundidade, área/profundidade e a relação ponderada são, respectivamente, (2,376, 3756,52), (2,474, 2640,93) e (2,371, 3629,22).

A **Figura 46** com os gráficos gerados para todos os possíveis valores de NSE mostra que os pares máximos de valores de NSE não coincidem. O valor máximo de NSEa obtido quando se otimiza a relação V-H não coincide com o NSEa obtido

quando se otimiza a relação S-H, como é facilmente observado quando se analisa os extremos dos gráficos.

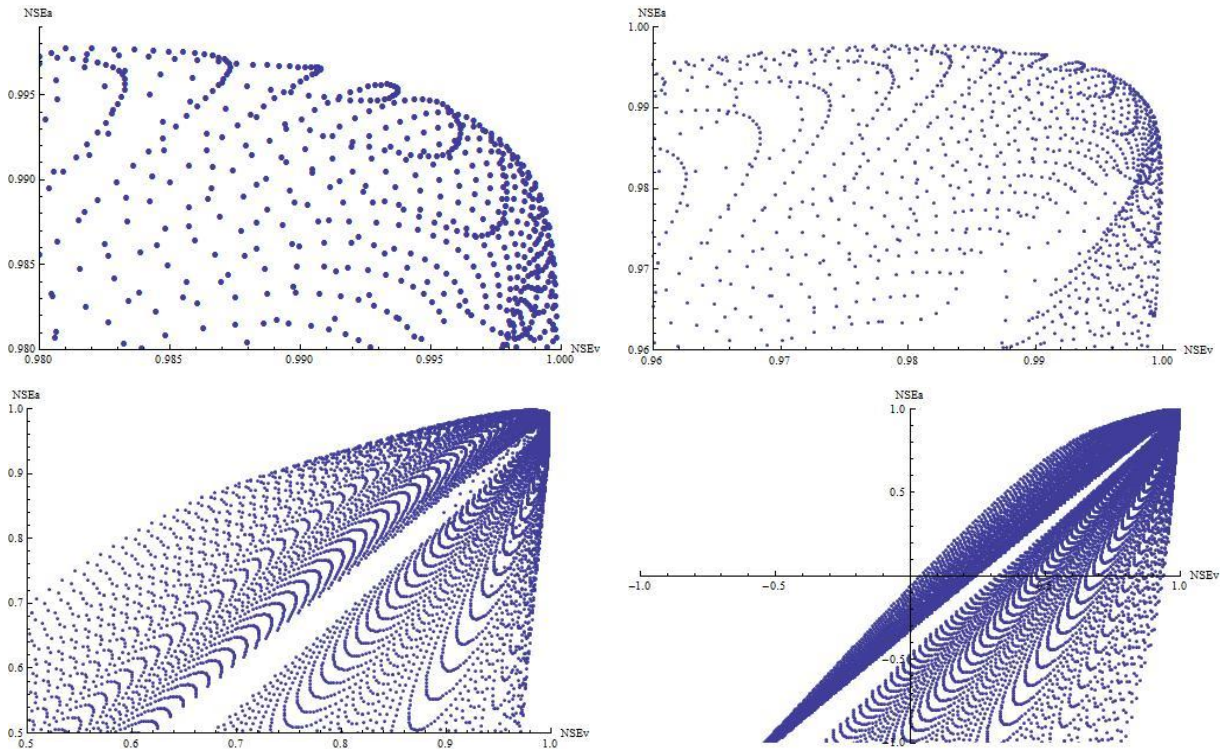


Figura 46 - Relação entre todas as combinações possíveis de NSE's, para o açude do Algodão, em diferentes escalas.

As curvas CAV ajustadas na **Figura 47** segundo os valores ótimos encontrados utilizando a função objetivo FO, mostram 0,99 valor de NSE,. A curva cota x área apresenta uma tendência linear, diferente dos demais reservatórios que apresentaram tendências exponenciais e a curva cota x volume tende a subestimar os valores de volume para as cotas mais altas.

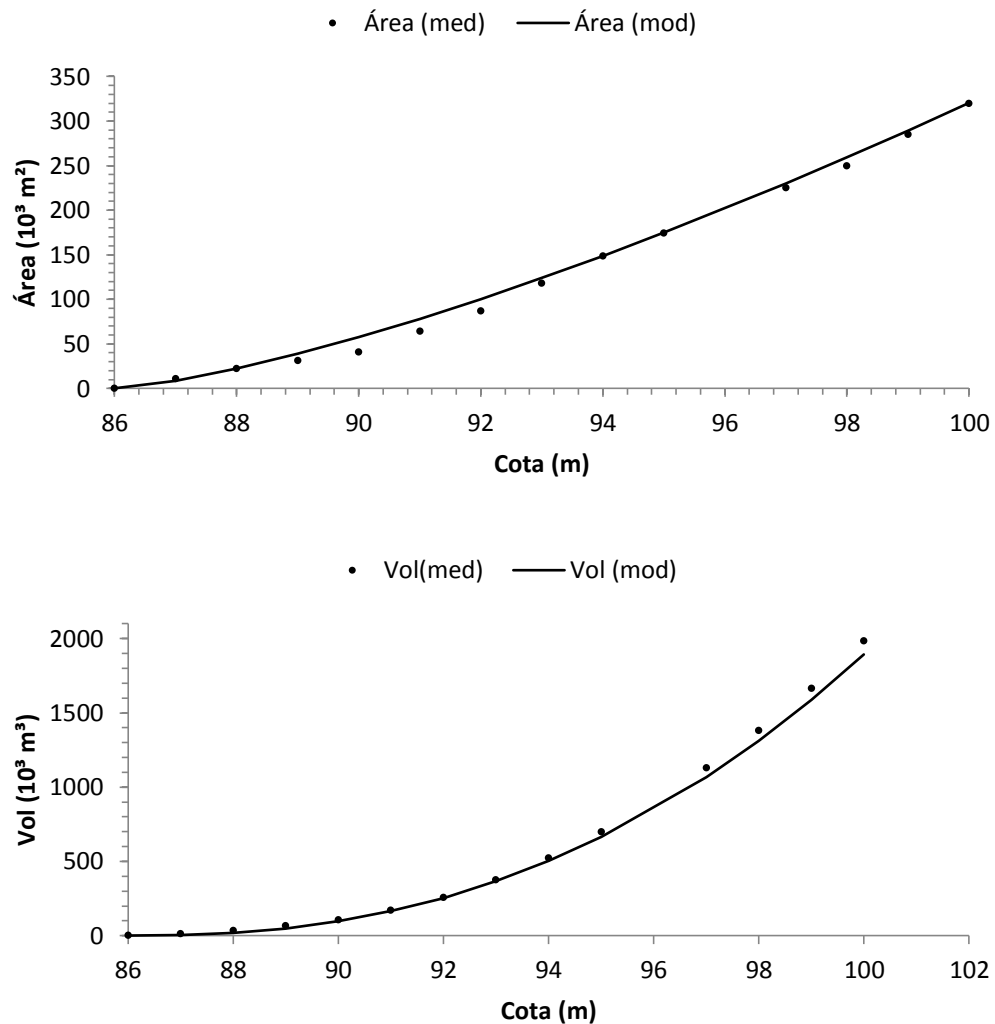


Figura 47- (a) Ajuste do modelo com os dados medidos para a variável de saída, área. (b) mostra o ajuste para o volume do reservatório.

4.3.1.7. Açude Fogareiro

A **Tabela 14** mostra a relação dos métodos e os valores de α e K encontrados durante a otimização para o açude do Fogareiro feita seguindo a metodologia proposta. O índice “v” nos parâmetros a otimização realizada para a relação $V \times H$ (volume/profundidade), o índice “a” aos valores dos parâmetros obtidos otimizando a relação $A \times H$ (área/profundidade) e o índice axv à otimização utilizando como função objetivo FO (relação ponderada).

Tabela 14 - Métodos de otimização utilizados e os respectivos valores das funções objetivo encontrados para o açude do Fogareiro.

Métodos	(α_v, K_v)	(α_a, K_a)	(α_{axv}, K_{axv})
NelderMead	(5,172, 2,2)	(5,049, 3,24)	(5, 3,96)
RandomSearch	(5,172, 2,2)	(5,049, 3,24)	(5, 3,96)
DifferentialEvolution	(5,199, 2)	(5,049, 3,24)	(5, 3,96)
SimulatedAnnealing	(5,172, 2,2)	(5,049, 3,24)	(4,52, 19,92)

Os valores mostrados na **Tabela 14** podem inicialmente parecer estranhos, uma vez que se encontram fora dos valores de contorno estabelecidos para os parâmetros, mas estes valores são aceitáveis, uma vez que o modelo geométrico de MOLLE (1994) foi feito para explicar a geometria de pequenos reservatórios e não de reservatórios do porte do Fogareiro. Portanto, esses valores obtidos para os parâmetros são de natureza puramente matemática, não tendo qualquer significado físico.

Há uma baixa variabilidade nos valores dos parâmetros que só ocorre entre relações e não entre métodos. Para as três relações o método que apresentou melhores valores foi o método Random Search. Os valores ótimos obtidos durante a otimização para as relações volume/profundidade, área/profundidade e a relação ponderada são, respectivamente, (5,172, 2,2), (5,049, 3,24) e (5, 3,96).

A **Figura 48** com os gráficos gerados para todos os possíveis valores de NSE mostra que os pares máximos de valores de NSE não coincidem, o valor máximo de NSEa obtido quando se otimiza a relação V-H não coincide com o NSEa obtido quando se otimiza a relação S-H, o que é observado quando se analisa os extremos dos gráficos.

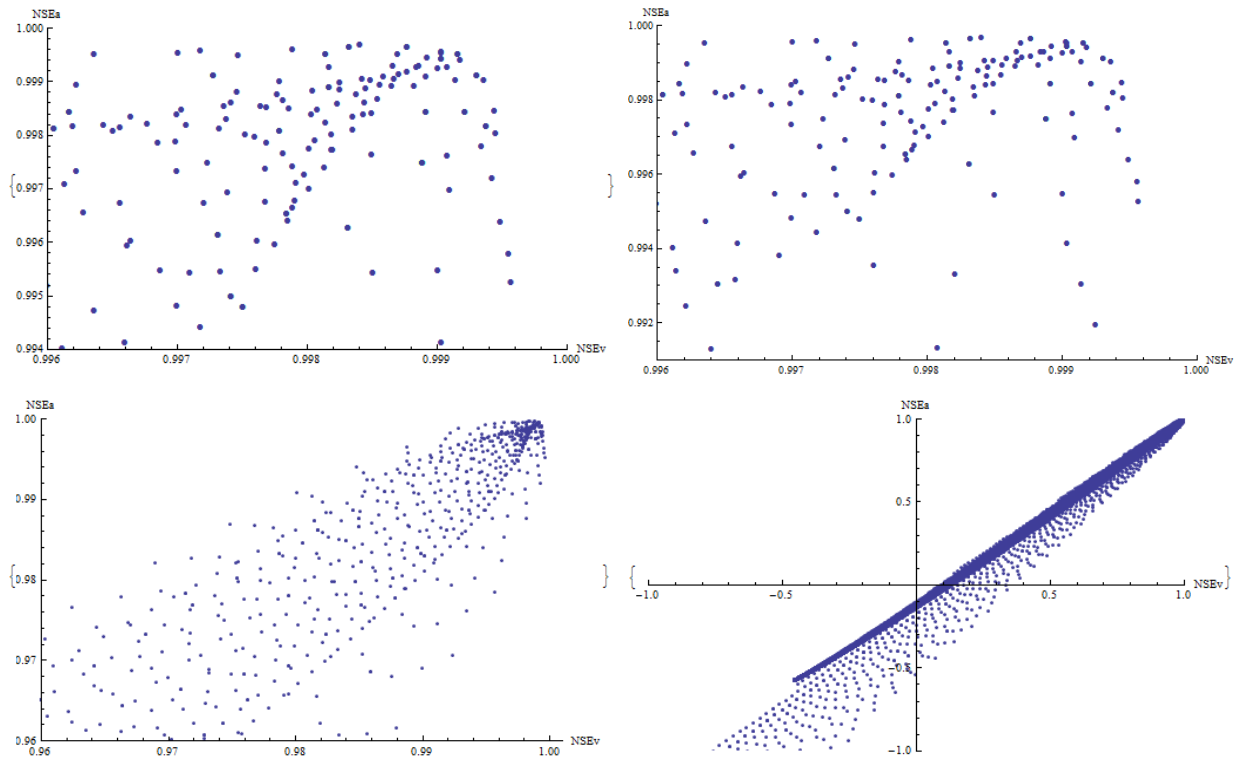


Figura 48 - A figura mostra a relação entre todas as combinações possíveis de NSE's, para o açude do Fogareiro, em diferentes escalas.

Apesar do modelo não responder bem para grandes reservatórios, utilizando as condições de contorno propostas por MOLLE (1994), é interessante verificar os ajustes feitos a curva CAV de projeto do reservatório. É possível perceber que mesmo os valores dos parâmetros sendo fisicamente inconsistentes com a proposta do modelo, ele consegue explicar bem a geometria do açude do Fogareiro, com um NSE de 0,99, **Figura 49**.

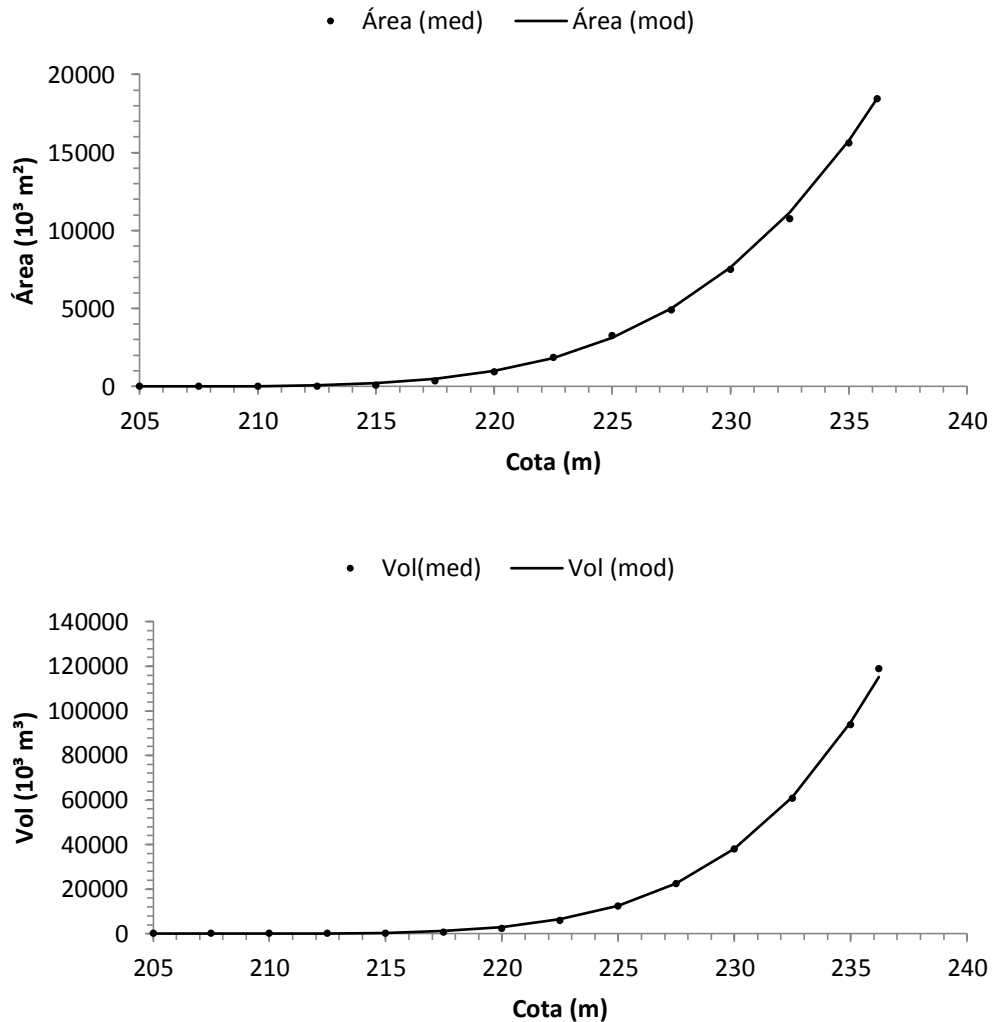


Figura 49-(a) Ajuste do modelo com os dados medidos para a variável de saída área. (b) Ajuste para o volume do reservatório.

4.3.1.8. Comparação dos açudes

Dos açudes estudados o que melhor se ajustou ao modelo proposto por Molle & Cadier (1992), com a proposta da função objetivo FO, foi o açude do Fogareiro, seguido dos açudes do Riacho Verde, Cambito, Algodão, Lagoa Cercada, Campina e Vista Alegre (**Tabela 15**). Considerando que as limitações nas batimetrias realizadas afetaram os ajustes ao modelo, da mesma forma em todos os açudes, é possível concluir que o modelo respondeu melhor à reservatórios do porte do Riacho Verde do que à açudes do porte dos demais (apesar do Fogareiro ter demonstrado melhor ajuste segundo a função FO, o valor dos parâmetros não tem consistência física). Esse resultado é deveras curioso pois o modelo utilizado foi proposto para

açudes com volume de 30.000 m³ a 600.000 m³ (MOLLE, 1994). Portanto, o modelo deveria responder melhor à açudes do porte do Lagoa Cercada, Cambito e Vista Alegre, provavelmente esse resultado seja devido à geometria bem definida do açude do Riacho Verde em detrimento a dos demais. Na **Figura 37** é possível perceber quão suaves e bem definidas são suas encostas; essa “boa geometria” favorece a adequação do modelo a esse reservatório.

A **Tabela 15** mostra os valores de FO obtidos durante a otimização; os valores de NSE mostrados nessa tabela foram obtidos ao aplicar os parâmetros α_{vxa} e K_{vxa} ao modelo; portanto são resultados de “validação” não de otimização. Os parâmetros mostrados nesta tabela são referentes a otimização utilizando a função objetivo FO, ou seja, a relação ponderada.

Tabela 15 – Valores de FO, NSE_A, NSE_V, α_{vxa} e K_{vxa} encontrados para cada açude.

Açude	FO	NSE_A	NSE_V	α_{vxa}	K_{vxa}
Fogareiro	9.20E-07	9.9946E-01	9.9921E-01	4.996	3.96
Riacho verde	5.92E-06	9.9757E-01	9.9995E-01	2.342	8515.96
Cambito	4.69E-05	9.9316E-01	9.9978E-01	2.576	2110.12
Algodão	5.12E-05	9.9425E-01	9.9574E-01	2.371	3629.22
Lagoa Cercada	9.25E-05	9.9039E-01	9.9958E-01	2.351	7685.09
Campina	1.01E-04	9.9014E-01	9.9818E-01	2.965	3073.25
Vista Alegre	1.56E-04	9.8751E-01	9.9939E-01	2.836	1676.71

Os valores do parâmetro ‘ α ’ mostrados na **Tabela 15** variaram entre os açudes, exceto para o par Riacho Verde e Lagoa Cercada. Esses dois açudes têm características geomorfológicas bem similares, em detrimento da grande diferença entre seus portes, com base nos valores dos parâmetros ‘ α ’ e ‘K’. O valor de K encontrado para o açude da Lagoa Cercada, segundo Molle (1994), é um valor atribuído a grandes reservatórios e o valor médio de K, segundo MOLLE e CADIER (1992) é de 1500. Portanto, com base nessa consideração parece evidente que os valores de K encontrados nesse trabalho são maiores do que os esperados, com base em valores médios regionais. Uma hipótese que pode ser levantada é que esses valores de K podem ser produto do assoreamento dos reservatórios. A princípio essa ideia parece ser inviável, uma vez que MOLLE e CADIER (1992), afirmaram que o valor de K “sempre diminui” em relação ao valor de K de projeto do reservatório. De fato, em termos de dimensão do reservatório o valor de K diminui,

mas em perda de profundidade, sem grande alteração nos formatos das encostas e sem alteração significativa no tamanho dos espelhos d'água para cada cota, ocorre um aumento no valor de K com base no tempo de vida da barragem (onde lê-se 'a' leia α):

Considere a relação:

$$V = K \cdot H^a \quad (I)$$

$$\frac{V}{K} = H^a$$

Aplicando-se logaritmo natural em ambos os lados, temos:

$$\ln \frac{V}{K} = \ln H^a$$

$$\ln V - \ln K = a \cdot \ln H$$

Derivando a equação acima em relação ao tempo, temos;

$$\frac{1}{V} \frac{dV}{dt} - \frac{1}{K} \frac{dK}{dt} = \frac{a}{H} \frac{dH}{dt} + \frac{da}{dt} \ln H \quad (II)$$

Derivando a equação (I) em relação a profundidade obtém-se a derivada total do volume em relação a profundidade.

O espelho d'água da bacia hidráulica (S) é expresso por:

$$S = a \cdot K \cdot H^{a-1} \quad (III)$$

Desenvolvendo a equação (III), e aplicando o logaritmo natural tem-se:

$$\frac{S}{K \cdot a} = H^{a-1}$$

$$\ln S - \ln K - \ln a = (a - 1) \cdot \ln H$$

Derivando a equação acima em relação ao tempo, obtém-se:

$$\frac{1}{S} \frac{dS}{dt} - \frac{1}{K} \frac{dK}{dt} - \frac{1}{a} \frac{da}{dt} = \frac{(a - 1)}{H} \frac{dH}{dt} + \frac{da}{dt} \ln H \quad (IV)$$

Logo, das equações (II) e (IV), temos um sistema:

$$\begin{cases} \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} - \frac{1}{K} \frac{dK}{dt} = \frac{a}{H} \frac{dH}{dt} + \frac{da}{dt} \ln H \\ \frac{1}{S} \frac{dS}{dt} - \frac{1}{K} \frac{dK}{dt} - \frac{1}{a} \frac{da}{dt} = \frac{(a-1)}{H} \frac{dH}{dt} + \frac{da}{dt} \ln H \end{cases}$$

1ª Hipótese:

Não há variação no tamanho do espelho d'água ao longo do tempo, ou seja, $\frac{dS}{dt} = 0$, o que não é verdade para as cotas mais baixas. Porém, considerando que a área para as cotas mais baixas não representa uma grande fração da área máxima da bacia hidráulica, é possível fazer essa aproximação sem grandes prejuízos ao resultado.

2ª Hipótese:

A variação do coeficiente de forma do reservatório é muito pequena em relação à variação das demais variáveis, ou seja, $\frac{da}{dt} = 0$, o que parece pertinente, uma vez que intervalo em que 'a' está definido é bem menor se comparado com o do parâmetro K.

Aplicando-se as hipóteses 1 e 2 no sistema, obtém-se:

$$\left\{ \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} - \frac{1}{K} \frac{dK}{dt} = \frac{a}{H} \frac{dH}{dt} \right. \quad (VI)$$

$$\left\{ -\frac{1}{K} \frac{dK}{dt} = \frac{(a-1)}{H} \frac{dH}{dt} \right. \quad (VII)$$

Isolando dH/dt na equação (VIII) e aplicando na equação (VI), temos;

$$\frac{dH}{dt} = -\frac{H}{K(a-1)} \frac{dK}{dt} \quad (VIII)$$

Com as equações (VIII) e (VI), temos:

$$\frac{1}{V} \frac{dV}{dt} - \frac{1}{K} \frac{dK}{dt} = \frac{a}{H} \left(-\frac{H}{K(a-1)} \frac{dK}{dt} \right)$$

Isolando dK/dt , temos:

$$-\frac{1}{K} \frac{dK}{dt} = -\frac{1}{KH^a} \frac{dV}{dt} - \frac{a}{H} \left(\frac{H}{K(a-1)} \frac{dK}{dt} \right)$$

Cancelando K em ambos os termos, tem-se:

$$\frac{dK}{dt} = \frac{1}{H^a} \frac{dV}{dt} + \frac{a}{(a-1)} \frac{dK}{dt}$$

Multiplicando ambos os membros por dt e isolando dK , tem-se:

$$dK = -\frac{(a-1)}{H^a} dV \tag{19}$$

A **Equação 19** carrega em si uma afirmação muito forte. Como o assoreamento produz perda de capacidade de armazenamento, dV será sempre negativo; ou seja, o valor do volume final será sempre menor que o valor do volume inicial armazenado no reservatório (volume de projeto). Como α se encontra entre 2,2 e 3,4 o termo $(\alpha - 1)$ será sempre positivo; logo, o segundo membro da equação sempre será um valor positivo, o que implica que dK é positivo, ou seja, o K final (após assoreamento) é maior do que o K inicial (valor de projeto). Esse resultado foi também obtido por Araújo et al (2006); usando um modelo piramidal para representar os reservatórios de seu estudo os valores mostraram que o valor desse parâmetro de fato aumenta devido ao assoreamento quando se considera α constante no tempo.

O açude da Lagoa Cercada foi construído em 30/09/1996 (SRH, 2008) e infelizmente seu projeto não está disponível. Como sua construção já data de mais de uma década, é tempo suficiente para a modificação de sua geometria pelo assoreamento.

Dentre os açudes estudados o que tem maior valor de α foi o açude da Campina, e o de menor valor de α foi o açude do Riacho Verde, estes dois açudes

representam os extremos geomorfológicos dos açudes estudados. O açude do Riacho Verde apresenta na maioria dos seus pontos, um perfil de vale côncavo, enquanto o açude da Campina mostra-se sempre com um perfil tendendo a vale em forma de “v”.

O valor médio encontrado para os α calibrados (excetuando o açude do Fogareiro) foi de 2,573 e o desvio padrão amostral foi de 0,271, estes valores estão abaixo dos encontrados por MOLLE (1994). Já os valores de ‘K’ calibrados média de 4448,39 e desvio padrão amostral de 2923,46. Note que os valores de α e K usados são referentes à otimização feita para a relação ponderada, onde não se privilegia nem a relação volume/profundidade nem a relação área/profundidade, mas pondera-se o resultado com a função objetivo FO.

Molle (1994, p. 64) sugere uma relação exponencial entre os parâmetros, mas de ajuste fraco, com o valor de $R^2 = 0,496$; resultado semelhante pôde ser observado com os poucos dados deste trabalho (**Figura 50**). Os parâmetros utilizados, mais uma vez correspondem aos obtidos pela otimização da relação ponderada (função objetivo FO).

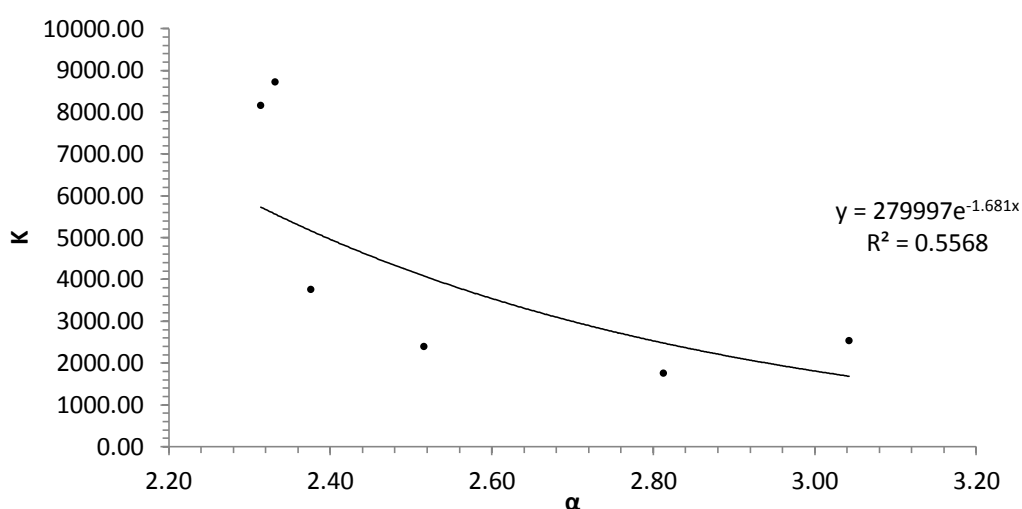


Figura 50 – Relação entre os valores de α e K otimizados.

4.3.2. Análise de sensibilidade

4.3.2.1. Açude do Cambito

Os resultados da análise de sensibilidade do açude do Cambito podem ser observados na **Tabela 16** e na **Figura 51** onde, a variação percentual do parâmetro é em relação ao seu valor ótimo, S_a é a sensibilidade do modelo ao parâmetro α e S_k a sensibilidade do modelo ao parâmetro 'K'.

Tabela 16 - Resultado da sensibilidade de cada parâmetro seguido da variação utilizada.

Varição(%)	S_a	S_k
10	928487.87	290.23
5	63012.10	65.04
1	614.77	7.76
-1	-494.26	-7.66
-5	-19298.37	-62.49
-10	-86036.00	-280.01

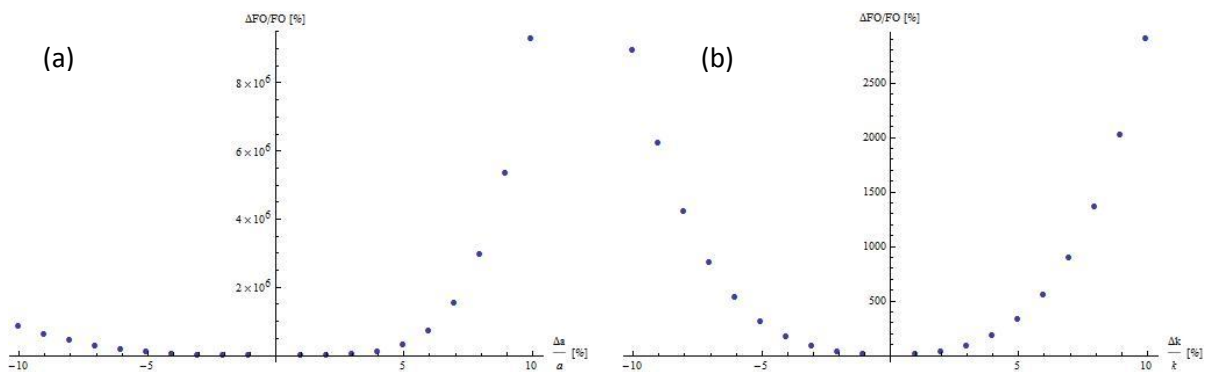


Figura 51 – (a) Variação percentual da função objetivo em relação ao seu ótimo contra a variação do parâmetro α em relação ao seu ótimo. (b) Variação percentual da função objetivo em relação ao seu valor ótimo e a variação percentual do parâmetro K em relação ao seu ótimo. Dados do açude do Cambito.

A **Tabela 16** mostra os resultados da sensibilidade das variáveis de saída do modelo para as variações de $\pm 10\%$, $\pm 5\%$ e $\pm 1\%$. Essas variações mostram a grande diferença entre as sensibilidades do modelo ao erro nos parâmetros. Pelo caráter exponencial do parâmetro α já era esperado sua grande influência nas variáveis de saída. Essa sensibilidade expressa em números mostra que se

superestimarmos o valor de α em 1% o resultado se afastará do seu resultado ótimo em 614,77 % do seu valor ótimo, enquanto que se o valor de α for subestimado em 1% o resultado se afastará do seu valor ótimo em 494,26 %. Já para o parâmetro 'K', por sua característica linear, o modelo parece não responder tanto a erros no valor desse parâmetro, ou seja, um erro de 1% para esse parâmetro corresponde à desvio no valor ótimo de apenas 7,76 %. Note que como os valores de FO são muito baixos esses erros não corresponde a uma grande alteração em seu valor.

Na **Figura 51** são mostrados dois gráficos, gráfico da esquerda, a relação entre a variação de α e seu valor ótimo em função da variação na função objetivo FO em relação ao seu ótimo. O gráfico da direita mostra a relação entre a variação do valor de 'K' e seu valor ótimo em função da variação da função objetivo em relação ao seu ótimo. Observa-se claramente, no gráfico da esquerda (análise de α), que superestimar os valores de α é muito mais danoso ao resultado final do que subestimá-lo, enquanto para o parâmetro 'K' observa-se uma certa isonomia.

Apesar dessa análise apontar relações importantes entre os valores dos parâmetros α e 'K' e as variáveis de saída, é importante lembrar que não é possível analisar se os valores das variáveis de saída serão superestimados ou subestimados com as variações propostas nos parâmetros. Note que (**Tabela 16**) quando se aplica uma variação positiva nos valores dos parâmetros, a sensibilidade dá valores positivos e quando se aplica variações negativas nos valores dos parâmetros, o valor da sensibilidade é negativo. Isso se deve ao fato de que a sensibilidade expressa a relação entre a variação do parâmetro e seu valor ótimo e da função objetivo e seu valor mínimo. Portanto, se para variações negativas a sensibilidade tivesse valores positivos, indicaria que o novo valor de FO que apareceu devido a variação do parâmetro é menor do que o anterior, ou seja, melhor do que a anterior. Indicaria, portanto, que o valor encontrado não corresponderia ao ótimo, mostrando que a análise de sensibilidade, além de dar uma ideia do erro nos resultados, também pode avaliar se durante a calibração foi de fato encontrado um valor ótimo para o parâmetro.

4.3.2.2. Açude do Riacho Verde

Os resultados da análise de sensibilidade do açude do Riacho Verde podem ser observados na **Tabela 17** e na **Figura 52**. Onde a variação citada corresponde a variação percentual realizada no parâmetro em relação ao seu valor ótimo, S_a é a sensibilidade do modelo ao parâmetro α e S_k a sensibilidade do modelo ao parâmetro 'K'.

Tabela 17- Sensibilidade de cada parâmetro e da variação utilizada.

Varição	S_a	S_k
10%	16387850.42	2278.88
5%	1001223.44	381.87
1%	5922.57	26.19
-1%	-4363.64	-24.77
-5%	-259698.51	-346.40
-10%	-1118032.08	-2136.96

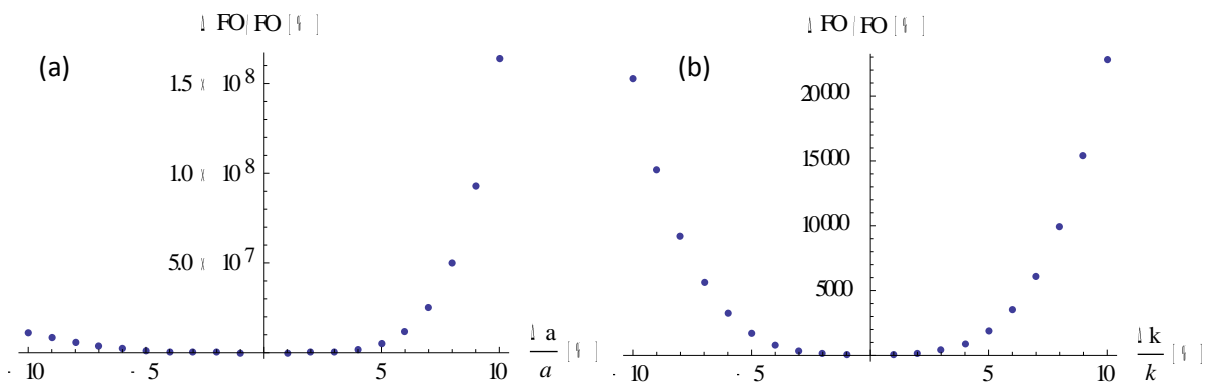


Figura 52– (a) Variação percentual da função objetivo em relação ao seu ótimo contra a variação do parâmetro α em relação ao seu ótimo. (b) Variação percentual da função objetivo em relação ao seu valor ótimo e a variação percentual do parâmetro K em relação ao seu ótimo. Dados do açude do Riacho Verde.

Como era de se esperar, o parâmetro α tem influência maior sobre as variáveis de saída. A **Tabela 17** mostra que um erro de +1% no valor de α provoca afastamento do resultado ótimo de 5922,57%, enquanto que o mesmo erro no valor de 'K' provoca um afastamento de apenas 26,19%, esta diferença entre os parâmetros se deve ao caráter exponencial do parâmetro α e o linear do parâmetro 'K'.

Na **Figura 52** têm-se uma visão geral do erro atribuído às variáveis de saída quando realiza-se variações no valor do parâmetro; o gráfico da esquerda mostra claramente que são atribuídos erros maiores às variáveis de saída quando se superestima os valores de α e que para o parâmetro 'K' existe uma certa isonomia.

4.3.2.3. Açude da Lagoa Cercada

Os resultados da análise de sensibilidade do açude Lagoa Cercada podem ser observados na **Tabela 18** e na **Figura 53**, onde a variação percentual é realizada no parâmetro em relação ao seu valor ótimo, S_a é a sensibilidade do modelo ao parâmetro α e S_K a sensibilidade do modelo ao parâmetro 'K'.

Tabela 18- Resultado da sensibilidade de cada parâmetro seguido da variação utilizada.

Variação (%)	S_a	S_K
-10	-28183.4	-189.02
-5	-5843.33	-45.95
-1	-200.50	-6.35
1	245.35	6.57
5	15145.34	51.55
10	187232.5	211.44

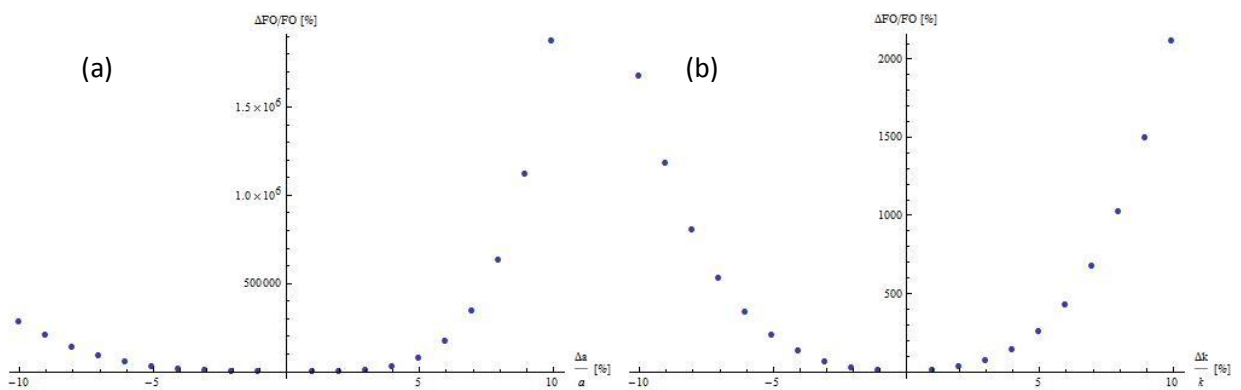


Figura 53– (a) Variação percentual da função objetivo em relação ao seu ótimo contra a variação do parâmetro α em relação ao seu ótimo. (b) Variação percentual da função objetivo em relação ao seu valor ótimo e a variação percentual do parâmetro K em relação ao seu ótimo. Dados do açude da Lagoa Cercada.

A **Tabela 18** mostra uma grande influência do parâmetro α sobre as variáveis de saída; para um erro de + 1% no valor de α , o afastamento do resultado ótimo é de 245,35% e 6,57% para mesma variação no parâmetro 'K'.

Na **Figura 53** são mostrados os gráficos das relações entre as variações dos parâmetros e as respectivas variações na função objetivo. O gráfico à esquerda na **Figura 53** mostra que superestimar valores de α provoca erros maiores do que subestimá-los. Já no gráfico à direita tem-se uma certa isonomia entre os valores mostrando que superestimar o valor de 'K' é tão ruim quanto subestimá-lo.

4.3.2.4. Açude da Vista Alegre

Os resultados da análise de sensibilidade do açude da Vista Alegre podem ser observados na **Tabela 19** e a **Figura 54**, onde a variação percentual realizada no parâmetro é em relação ao seu valor ótimo, S_a é a sensibilidade do modelo ao parâmetro α e S_K a sensibilidade do modelo ao parâmetro 'K'.

Tabela 19 - Sensibilidade de cada parâmetro e variação utilizada.

Varição	S_a	S_K
-10	-26496.08	-82.20
-5	-6326.77	-23.37
-1	-222.87	-3.67
1	291.47	3.78
5	23222.29	26.15
10	354481.49	93.32

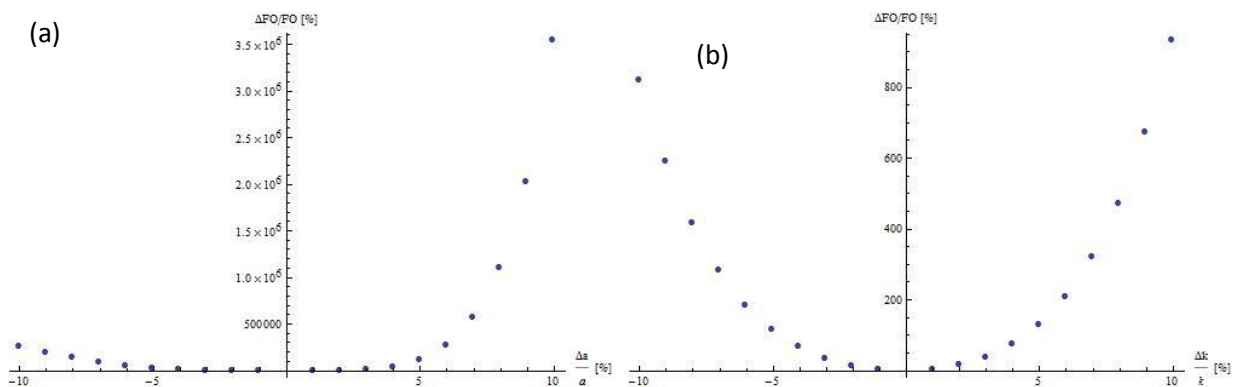


Figura 54 – (a) Variação percentual da função objetivo em relação ao seu ótimo contra a variação do parâmetro α em relação ao seu ótimo. (b) Variação percentual da função objetivo em relação ao seu valor ótimo e a variação percentual do parâmetro K em relação ao seu ótimo. Dados do açude da Vista Alegre.

Na **Tabela 19** é possível verificar a grande influência da variação do parâmetro α no resultado das variáveis de saída; para o parâmetro 'K' essa variação é mais modestas para pequenas variações, tornando-se maior a medida que o desvio do valor ótimo vai crescendo. Para fins de comparação, pode-se usar uma variação unitária. Para uma variação de +1% no valor de α tem-se um desvio na função objetivo de 291,47% enquanto uma variação de +1% no valor de 'K' produz apenas uma leve variação de 3,78% no valor da função objetivo.

Na **Figura 54** são apresentados os gráficos das variações parâmetros contra as variações sofridas na função objetivo; enquanto existe uma certa isonomia no gráfico da direita, variação dos valores de 'K,' no gráfico a esquerda as variações positivas são muito mais danosas ao resultado final do que as variações negativas; ou seja, superestimar os valores de α é pior para o resultado do que subestimá-lo.

4.3.2.5. Açude da Campina

Os resultados da análise de sensibilidade do açude da Campina podem ser observados na **Tabela 20** e na **Figura 55**, onde a variação percentual realizada no parâmetro é em relação ao seu valor ótimo, S_a é a sensibilidade do modelo ao parâmetro α e S_k a sensibilidade do modelo ao parâmetro 'K'.

Tabela 20 - Sensibilidade de cada parâmetro e variação utilizada.

Varição	S_a	S_k
-10	-25518.61	-60.26
-5	-6534.19	-19.18
-1	-244.87	-3.33
1	349.80	3.49
5	29629.89	23.16
10	500298.51	76.15

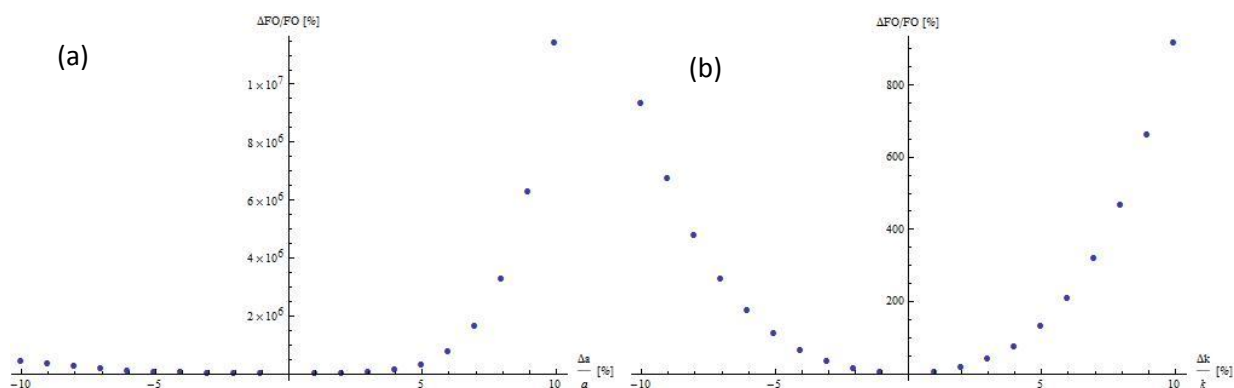


Figura 55 – (a) Variação percentual da função objetivo em relação ao seu ótimo contra a variação do parâmetro α em relação ao seu ótimo. (b) Variação percentual da função objetivo em relação ao seu valor ótimo e a variação percentual do parâmetro K em relação ao seu ótimo. Dados do açúcar da Campina.

Na **Tabela 20** é possível verificar a grande influência da variação do parâmetro α no resultado das variáveis de saída. Para o parâmetro 'K' essa variação é mais modestas para pequenas variações, tornando-se maior a medida que o desvio do valor ótimo vai crescendo; para fins de comparação, pode-se usar uma variação unitária. Uma variação de +1% no valor de α produz um desvio na função objetivo de 349,80% enquanto uma variação de +1% no valor de 'K' produz apenas uma leve variação, de 3,49%, no valor da função objetivo.

Na **Figura 55** são apresentados os gráficos das variações dos parâmetros contra as variações sofridas na função objetivo; enquanto existe uma certa isonomia no gráfico da direita, de variação dos valores de 'K,' o gráfico da esquerda mostra que as variações positivas são muito mais danosas ao resultado final do que as variações negativas; ou seja, superestimar os valores de α é pior para o resultado do que subestimá-lo.

4.3.2.6. Açúcar do Algodão

Os resultados da análise de sensibilidade do açúcar do Algodão podem ser observados na **Tabela 21** e na **Figura 56**, onde a variação percentual realizada no parâmetro é em relação ao seu valor ótimo, S_a é a sensibilidade do modelo ao parâmetro α e S_k a sensibilidade do modelo ao parâmetro 'K'.

Tabela 21 - Sensibilidade de cada parâmetro e variação utilizada.

Varição	S_a	S_K
-10	-100061.75	-342.49
-5	-23721.56	-104.95
-1	-832.81	-17.13
1	1227.08	17.44
5	94167.63	112.84
10	1426337.98	374.02

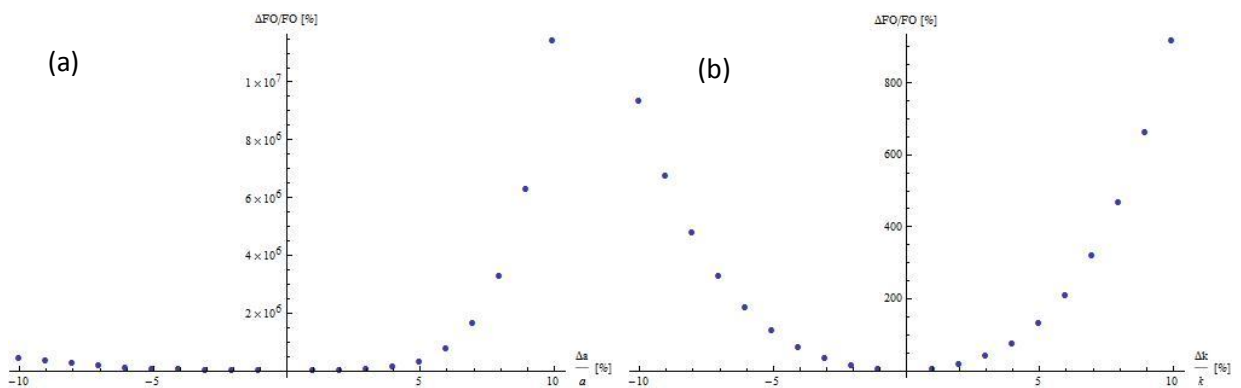


Figura 56 – (a) Variação percentual da função objetivo em relação ao seu ótimo contra a variação do parâmetro α em relação ao seu ótimo. (b) Variação percentual da função objetivo em relação ao seu valor ótimo e a variação percentual do parâmetro K em relação ao seu ótimo. Dados do açude do Algodão.

Na **Tabela 21** é possível verificar a grande influência da variação do parâmetro α no resultado das variáveis de saída. Para o parâmetro 'K' essa variação é mais modesta para pequenas variações, tornando-se maior à medida que o desvio do valor ótimo vai crescendo. Para fins de comparação pode-se usar uma variação unitária, para uma variação de +1% no valor de α tem-se um desvio na função objetivo de 1227,08%, enquanto uma variação de +1% no valor de 'K' produz apenas uma leve variação de 17,44% no valor da função objetivo.

Na **Figura 56** são apresentados os gráficos das variações dos parâmetros contra as variações sofridas na função objetivo, enquanto existe uma certa isonomia no gráfico da direita, de variação dos valores de 'K,' o gráfico da esquerda mostra que as variações positivas são muito mais danosas ao resultado final do que as variações negativas; ou seja, superestimar os valores de α é pior para o resultado do que subestimá-lo.

4.3.2.7. Açude Fogareiro

Os resultados da análise de sensibilidade do açude do Fogareiro podem ser observados na **Tabela 22** e na **Figura 57**, onde a variação percentual realizada no parâmetro é em relação ao seu valor ótimo, S_a é a sensibilidade do modelo ao parâmetro α e S_K a sensibilidade do modelo ao parâmetro 'K'.

Tabela 22 - Resultado da sensibilidade de cada parâmetro seguido da variação utilizada.

Variação	S_a	S_K
-10	-23126800.56	-5191.82
-5	-11411753.55	-824.09
-1	-325331.85	-62.31
1	729883.77	71.39
5	385909887.55	1050.97
10	25618261724.54	6099.33

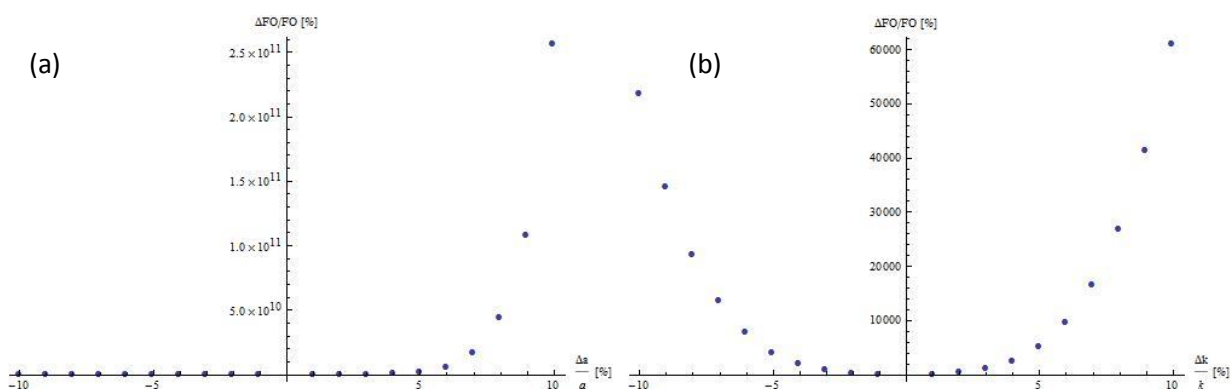


Figura 57 – (a) Variação percentual da função objetivo em relação ao seu ótimo contra a variação do parâmetro α em relação ao seu ótimo. (b) Variação percentual da função objetivo em relação ao seu valor ótimo e a variação percentual do parâmetro K em relação ao seu ótimo. Dados do açude do Fogareiro.

Na **Tabela 22** é possível verificar a grande influência da variação do parâmetro α no resultado das variáveis de saída. Para o parâmetro 'K' essa variação é mais modesta para pequenas variações, tornando-se maior à medida que o desvio do valor ótimo vai crescendo. Para fins de comparação pode-se usar uma variação unitária; para uma variação de +1% no valor de " α " tem-se um desvio na função objetivo de 729883,77% enquanto que para uma variação de +1% no valor de 'K' produz apenas uma variação de 71,39% no valor da função objetivo; note que esse

valor excede todos os valores mostrados até agora. Todavia, vale ressaltar que o reservatório do Fogareiro se encontra em uma escala muito maior do que a escala dos demais açudes e como agravante, o modelo não consegue explicar, fisicamente, o reservatório, com base nos parâmetros. Essa análise de sensibilidade, em particular, foi feita apenas para fins ilustrativos e não será usada na sessão seguinte, onde se compararão os resultados.

Na **Figura 57** são apresentados os gráficos das variações nos parâmetros contra as variações sofridas na função objetivo. Note que enquanto existe uma certa isonomia no gráfico da direita, de variação dos valores de 'K,' o gráfico da esquerda mostra que as variações positivas são muito mais danosas ao resultado final do que as variações negativas; ou seja, superestimar os valores de α é pior para o resultado do que subestimá-lo.

4.3.2.8. Comparação dos açudes

Uma análise de sensibilidade conjunta é necessária para avaliar a resposta dos diferentes parâmetros para açudes de diferentes condições geomorfológicas.

A **Figura 58** mostra a sensibilidade do modelo ao parâmetro " α " gerados para os diferentes açudes. No canto superior esquerdo, uma pequena janela mostra ampliadas as inclinações da curva para as variações negativas do parâmetro; as curvas estão completas para todos os açudes, exceto para o Riacho Verde. A curva desse açude é mostrada apenas em um intervalo de -7% até 6%. Esse corte foi necessário para que as curvas sejam visualizadas na mesma escala.

Nessa figura é possível perceber que a resposta das variáveis de saída à variação do parâmetro se comporta de forma diferente para os diferentes açudes. O açude com maior resposta nas variáveis de saída a variação no parâmetro é o do Riacho Verde, seguido dos açudes do Algodão, Cambito, Campina, Vista Alegre e Lagoa Cercada.

Nesse estudo, considera-se que a expressão "maior resposta" significa que o afastamento de valores ótimos ocorreu para menores variações nos parâmetros. É interessante notar que essa ordem corresponde a ordem do açude com maior profundidade para o de menor profundidade indicando que as variáveis de saída dos açudes com maior profundidade respondem mais às mudanças nos valores dos

parâmetros do que açudes menos profundos (salvo para uma pequena inversão que ocorre na ordem dos açudes Cambito e Campina) pois a profundidade é a única variável de entrada do modelo geométrico; portanto, a variável que introduz os erros.

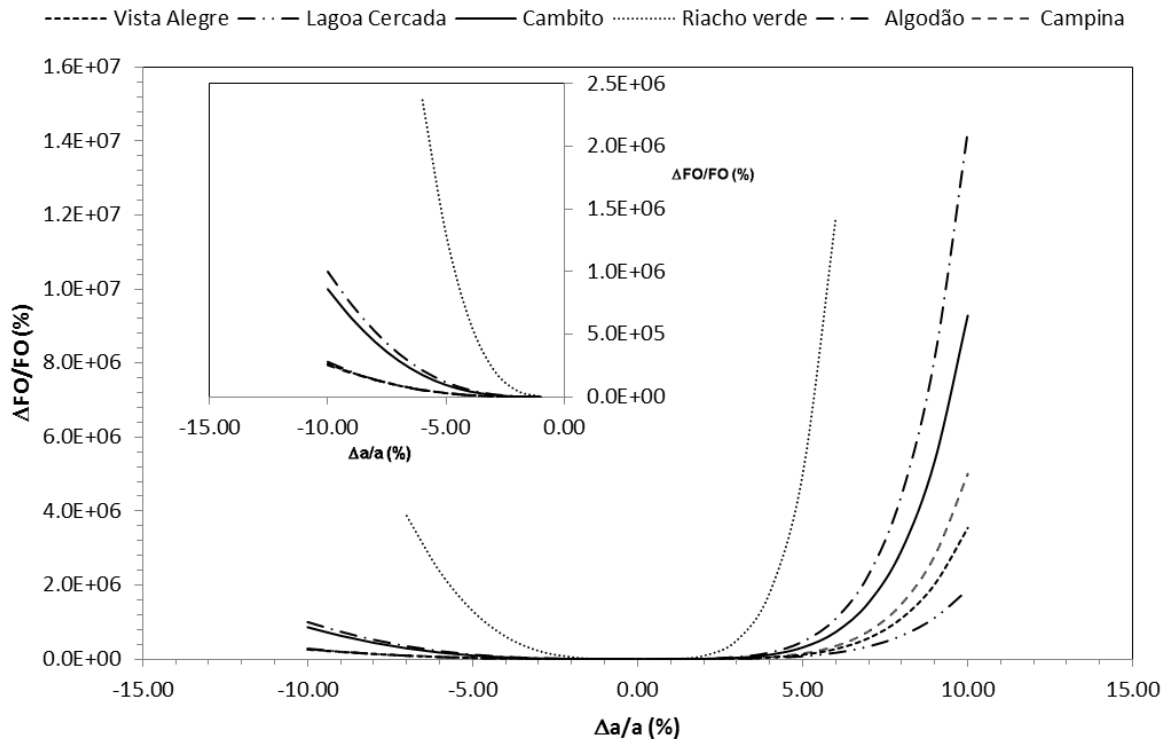


Figura 58 – Curvas de sensibilidade para o parâmetro ‘ α ’ dos diferentes açudes.

A **Figura 59** mostra o conjunto das curvas de sensibilidade para o parâmetro ‘K’; como o exemplo da **Figura 58**, não foi mostrada toda a curva de sensibilidade do reservatório do Riacho Verde, mas somente a parte que está contida no intervalo - 7% à 7%, possibilitando a análise dos gráficos na mesma escala. Diferente do que é observado na análise conjunta para o parâmetro “ α ”, as curvas não estão dispostas da maior profundidade para a menor. Apesar da curva do açude do Riacho Verde demonstrar que as variáveis de saída desse reservatório são mais sensíveis à variação do parâmetro ‘K’ do que a dos demais açudes, não é encontrada nenhuma relação evidente entre a profundidade e a sensibilidade do modelo ao parâmetro. Para esse parâmetro, os açudes que possuem as variáveis de saída mais sensíveis à variação do parâmetro em ordem decrescente são: açude do Riacho Verde, Algodão, Cambito, Lagoa Cercada e Vista Alegre. Essa ordem não corresponde a

ordem decrescente de profundidade já que o açude da Vista Alegre tem profundidade maior do que a do açude da Lagoa Cercada.

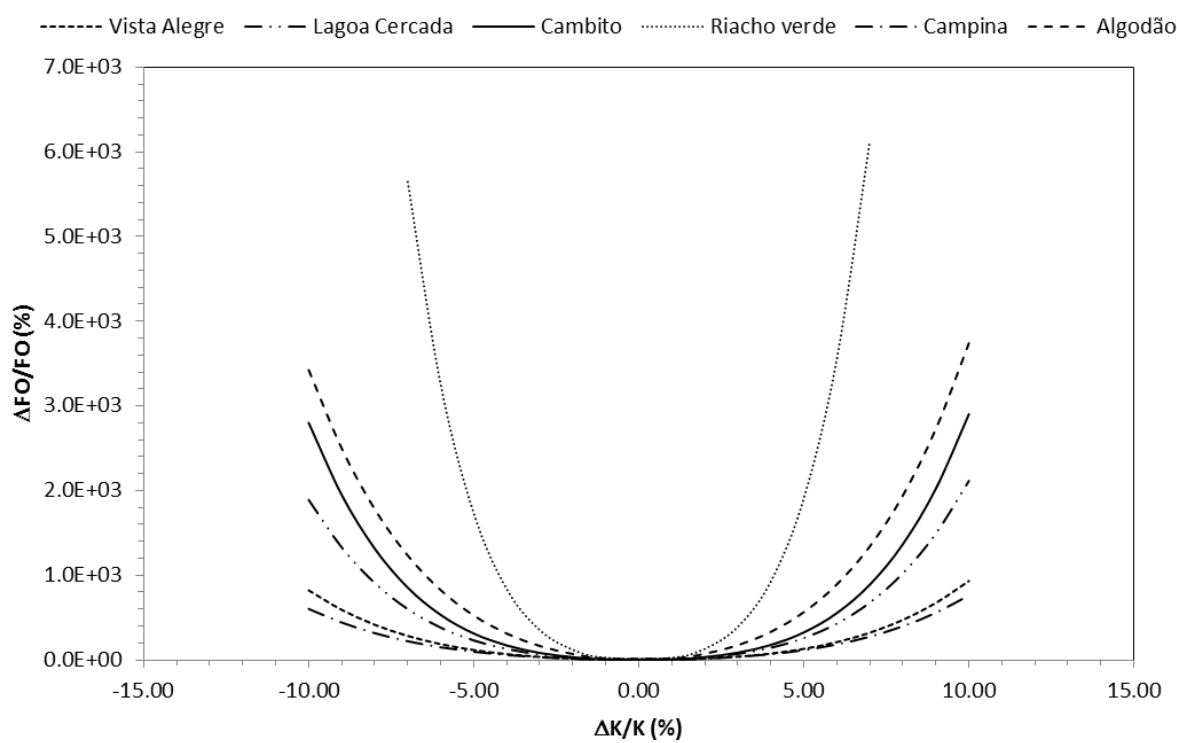


Figura 59 – Curvas de sensibilidade para o parâmetro α dos diferentes açudes.

4.3.3. Rebaixamento do nível dos reservatórios

4.3.3.1. Açude do Cambito

O reservatório do Cambito teve seu nível monitorado de 15/02/2012 até 26/09/2012, ininterruptamente. No início do monitoramento, o reservatório encontrava-se com 69,20% de sua capacidade e ao final do monitoramento com 39,77% com, uma queda de 29,43% em quase sete meses. A perda de volume durante esse período ocorreu de forma muito irregular, com média de 823m³/dia; que corresponde ao somatório de todas as saídas. A área teve uma diminuição média de 200m²/dia, o que em termos de hectares corresponde a uma fatia bem pequena.

O rebaixamento do açude, em termos de nível, ocorreu seguindo três etapas, como indicados pelas linhas de tendência na **Figura 60**; a primeira etapa nos meses de fevereiro e março, a segunda etapa de abril a julho e a terceira etapa, com um rebaixamento mais intenso, de julho até setembro. A taxa de rebaixamento para o período foi de 6,97mm/dia. A **Figura 60** apresenta “desnível” como sendo o nível do açude em relação ao seu ponto de sangria. Nessa figura são mostradas a pluviometria dos postos mais próximos da região do açude.

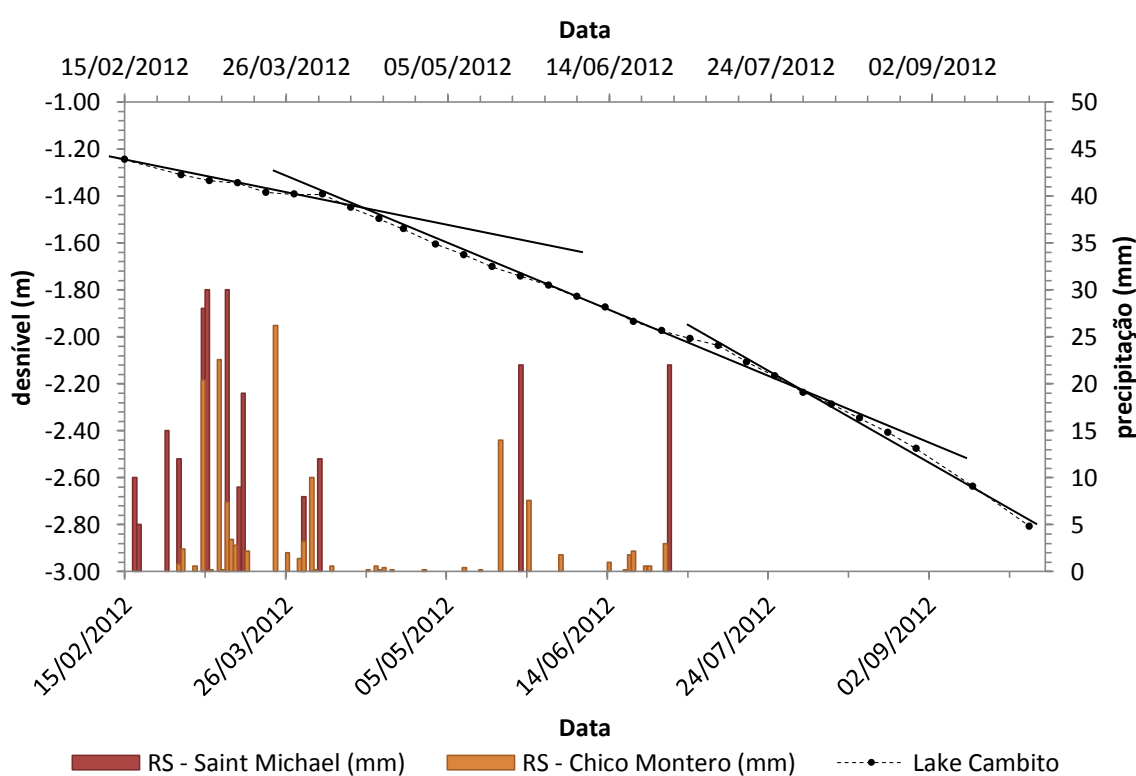


Figura 60 - Curva de rebaixamento do açude do Cambito e pluviometria.

4.3.3.2. Açude do Riacho Verde

O reservatório do Riacho Verde teve seu nível monitorado de 15/02/2012 a 26/09/2012, ininterruptamente. No início do monitoramento o reservatório encontrava-se com 61,35% de sua capacidade e ao final do monitoramento com 41,03%, uma queda de 20,32% em quase sete meses. A perda de volume durante esse período ocorreu de forma muito irregular, com média de 5100 m³/dia que

correspondem ao somatório de todas as saídas. A área teve uma diminuição média de 600 m²/dia, o que, em termos de hectares, corresponde à uma fatia bem pequena.

O rebaixamento do açude, em termos de nível, ocorreu seguindo três etapas, como indicados pelas linhas de tendência na **Figura 61**. A primeira etapa ocorre nos meses de fevereiro e março, a segunda etapa ocorre de abril a julho. A terceira etapa, com um rebaixamento mais intenso, ocorre de julho até setembro. A taxa de rebaixamento para o período foi de 9,20 mm/dia. A **Figura 61** apresenta “desn” como sendo o nível do açude em relação ao seu ponto de sangria. Nessa figura são mostradas as pluviometrias dos postos mais próximos da região do açude.

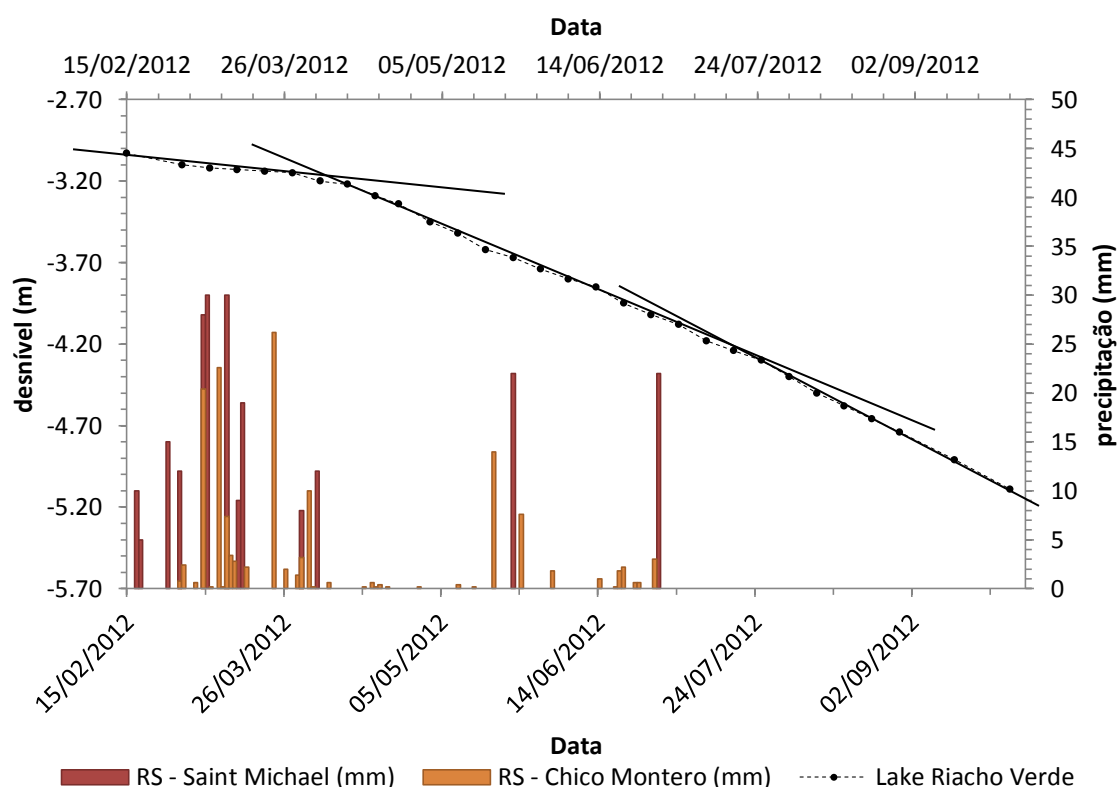


Figura 61 - Curva de rebaixamento do açude do Riacho Verde e pluviometria.

O grande rebaixamento é devido à regularidade com que o reservatório libera água para perenizar o Riacho da Forquilha; a água é bombeada diariamente, com altas vazões.

4.3.3.3. Açude da Lagoa Cercada

O reservatório do Riacho Verde teve seu nível monitorado de 15/02/2012 a 26/09/2012, ininterruptamente. No início do monitoramento o reservatório encontrava-se com 71,70% de sua capacidade e ao final do monitoramento com 34,13%, uma queda de 37,57% em quase sete meses. A perda de volume durante esse período ocorreu de forma muito irregular, com uma média de 1100 m³/dia. Essas perdas correspondem ao somatório de todas as saídas. A área teve uma diminuição média de 300 m²/dia, o que em termos de hectares corresponde a uma fatia bem pequena.

O rebaixamento do açude, em termos de nível, ocorreu seguindo três etapas, como indicados pelas linhas de tendência na **Figura 62**; a primeira etapa ocorreu nos meses de fevereiro e março; a segunda etapa de abril a junho e a terceira etapa, com um rebaixamento mais intenso, de junho até setembro. A taxa de rebaixamento para o período foi de 7,08 mm/dia. A **Figura 62** apresenta “desnível” como sendo o nível do açude em relação ao seu ponto de sangria. Nessa figura são mostradas as pluviometrias dos postos mais próximos da região do açude.

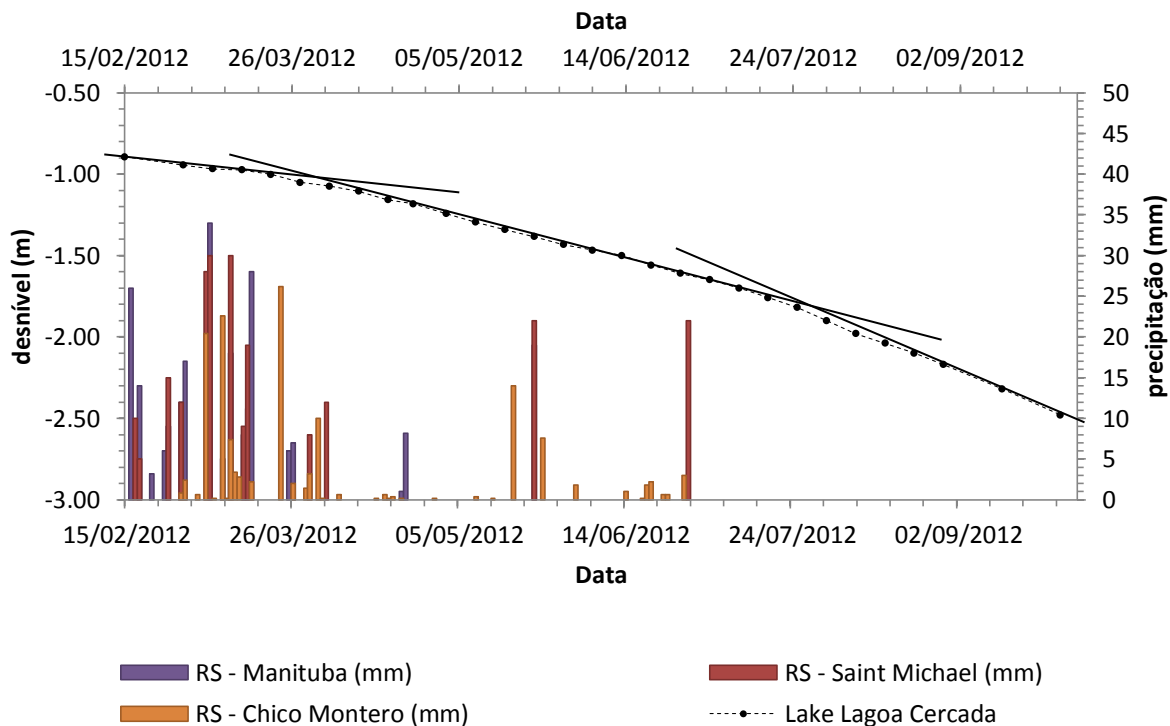


Figura 62 - Curva de rebaixamento do açude da Lagoa Cercada e pluviometria.

Apesar dos reservatórios estarem bem próximos e serem usados por comunidades com necessidades similares, percebe-se que há uma diferença relevante no nível de rebaixamento dos reservatórios, provavelmente pela pequena ruptura na parede do reservatório da Lagoa Cercada (reverssa). Aparentemente essa é a única explicação plausível, uma vez que ambos possuem apenas uma caixa d'água bombeando água para cada comunidade e não libera água com sifão de forma significativa, como é caso do reservatório da lagoa Cercada.

4.3.3.4. Açude da Vista Alegre

O reservatório da Vista Alegre teve seu nível monitorado de 23/05/2012 a 26/09/2012, ininterruptamente. Apesar do monitoramento nesse reservatório ter começado no mesmo período que os outros, houve problemas de monitoramento que comprometeram os dados de fevereiro, março e começo de abril. No início do monitoramento o reservatório encontrava-se com 47,59 % de sua capacidade e ao

final do monitoramento, com 32,32%, uma queda de 15,27% em quase quatro meses. A perda de volume durante esse período ocorreu de forma muito irregular, com média de 1020 m³/dia; essas perdas correspondem ao somatório de todas as saídas. A área teve uma diminuição média de 300 m²/dia, que, em termos de hectares, corresponde a uma fatia bem pequena.

O rebaixamento do açude, em termos de nível, ocorreu seguindo duas etapas, indicadas pelas linhas de tendência na **Figura 63**. A primeira etapa ocorreu nos meses de junho e julho; e a segunda etapa, de julho a setembro; a taxa de rebaixamento para o período foi de 7,03 mm/dia. A **Figura 63** apresenta “desnível” como sendo o nível do açude em relação ao seu ponto de sangria. Nessa figura são mostradas as pluviometrias dos postos mais próximos da região do açude.

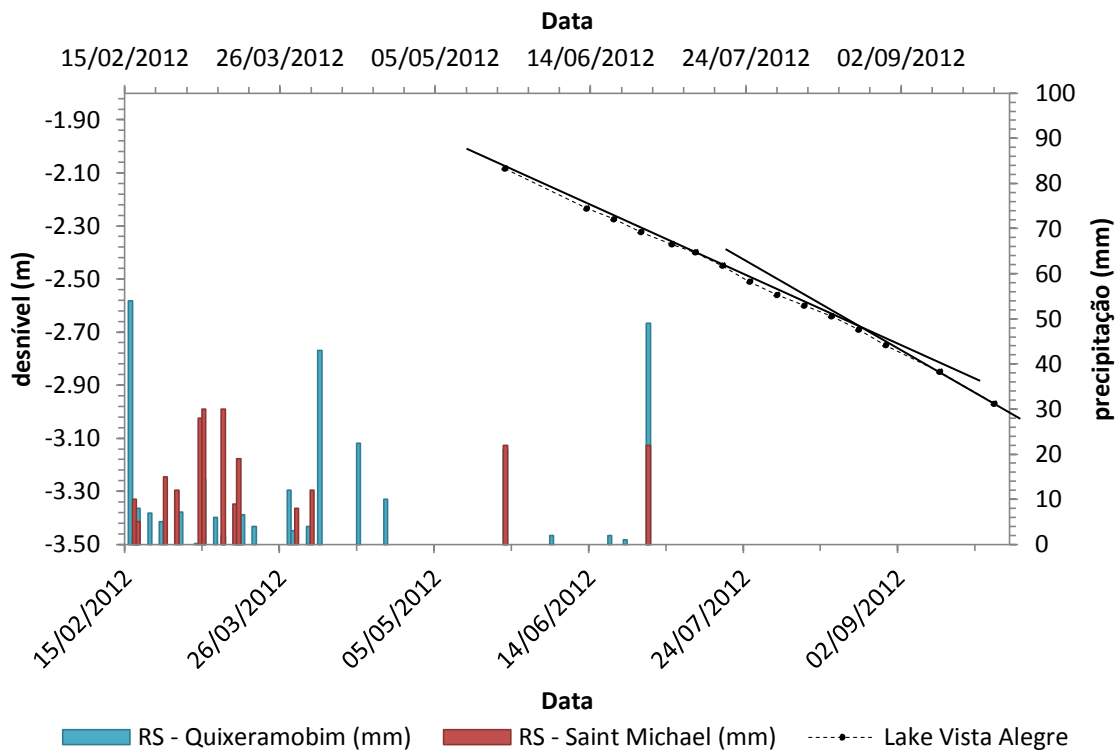


Figura 63 - Curva de rebaixamento do açude da Vista Alegre e pluviometria.

4.3.3.5. Açude da Campina

O reservatório da Campina teve seu nível monitorado de 15/02/2012 a 26/09/2012, ininterruptamente. No início do monitoramento o reservatório encontrava-se com 63,25 % de sua capacidade e ao final do monitoramento com 31,39%, uma queda de 31,86% em quase sete meses. A perda de volume durante esse período ocorreu de forma muito irregular, com média de 5840 m³/dia; essas perdas correspondem ao somatório de todas as saídas. A área teve uma diminuição média de 1300 m²/dia, que em termos de hectares corresponde a uma fatia bem pequena. Essa alta taxa de diminuição da área está ligada a forma das encostas do açude; sua geometria em forma de “v” permite tal taxa em detrimento da encosta côncava do açude do Riacho Verde.

O rebaixamento do açude, em termos de nível, ocorreu de forma diferente dos demais reservatórios, como indicado pelas linhas de tendência na **Figura 64**. Segundo a linha de rebaixamento houve somente uma única tendência, facilmente representada por uma única linha; a taxa de rebaixamento para o período foi de 8,97 mm/dia. A **Figura 64** apresenta “desnível” como sendo o nível do açude em relação ao seu ponto de sangria. Nessa figura são mostradas a pluviometria dos postos mais próximos da região do açude.

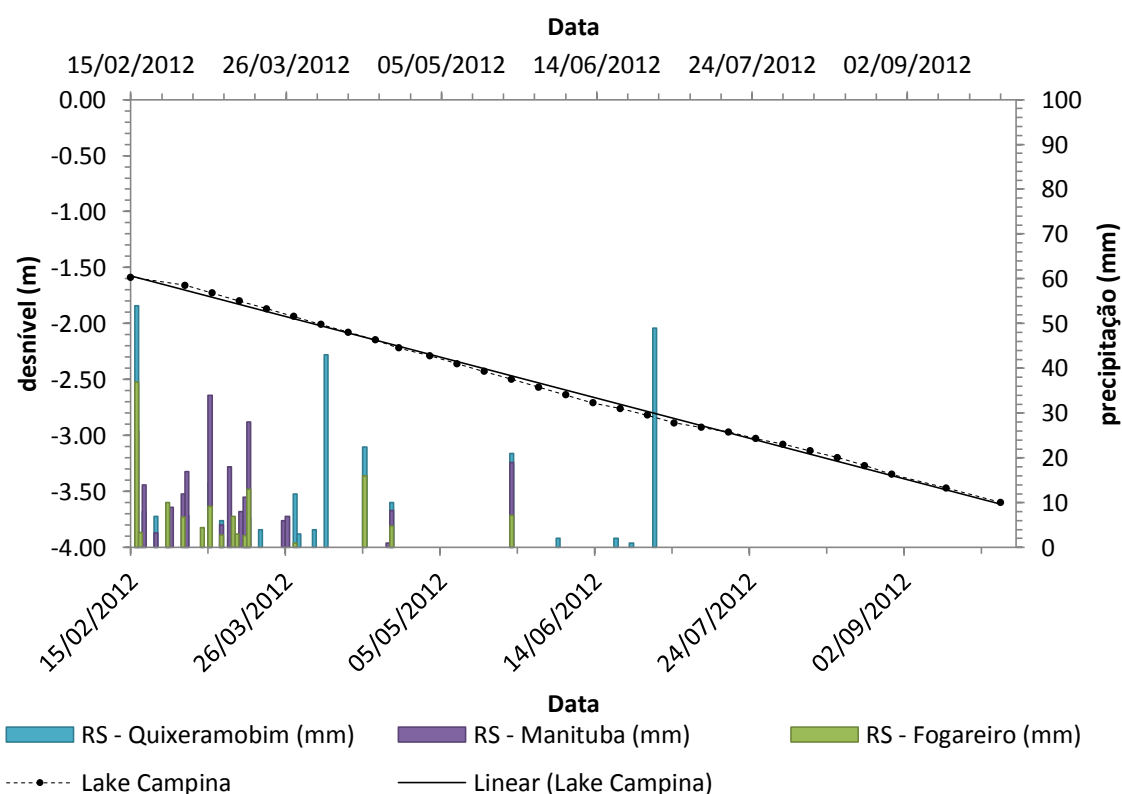


Figura 64 - Curva de rebaixamento do Açude da Campina.

4.3.3.6. Açude do Algodão

O reservatório Algodão teve seu nível monitorado de 07/03/2012 a 26/09/2012, ininterruptamente. No início do monitoramento o reservatório encontrava-se com 77,71% de sua capacidade e ao final do monitoramento, com 58,06%, uma queda de 19,65% em quase seis meses. A perda de volume durante esse período ocorreu de forma muito irregular, com média de 1920 m³/dia; essas perdas correspondem ao somatório de todas as saídas. A área teve uma diminuição média de 200 m²/dia o que, em termos de hectares, corresponde a uma fatia bem pequena.

O rebaixamento do açude, em termos de nível, ocorreu seguindo três etapas, como indicado pelas linhas de tendência na **Figura 65**. A primeira etapa ocorreu nos meses de março e abril, a segunda etapa de maio à agosto e a terceira etapa, com um rebaixamento mais intenso é percebida apenas no mês de setembro; a taxa de

rebaixamento para o período foi de 7,16 mm/dia. A **Figura 65** apresenta “desnível” como sendo o nível do açude em relação ao seu ponto de sangria. Nessa figura são mostradas as pluviometrias dos postos mais próximos da região do açude.

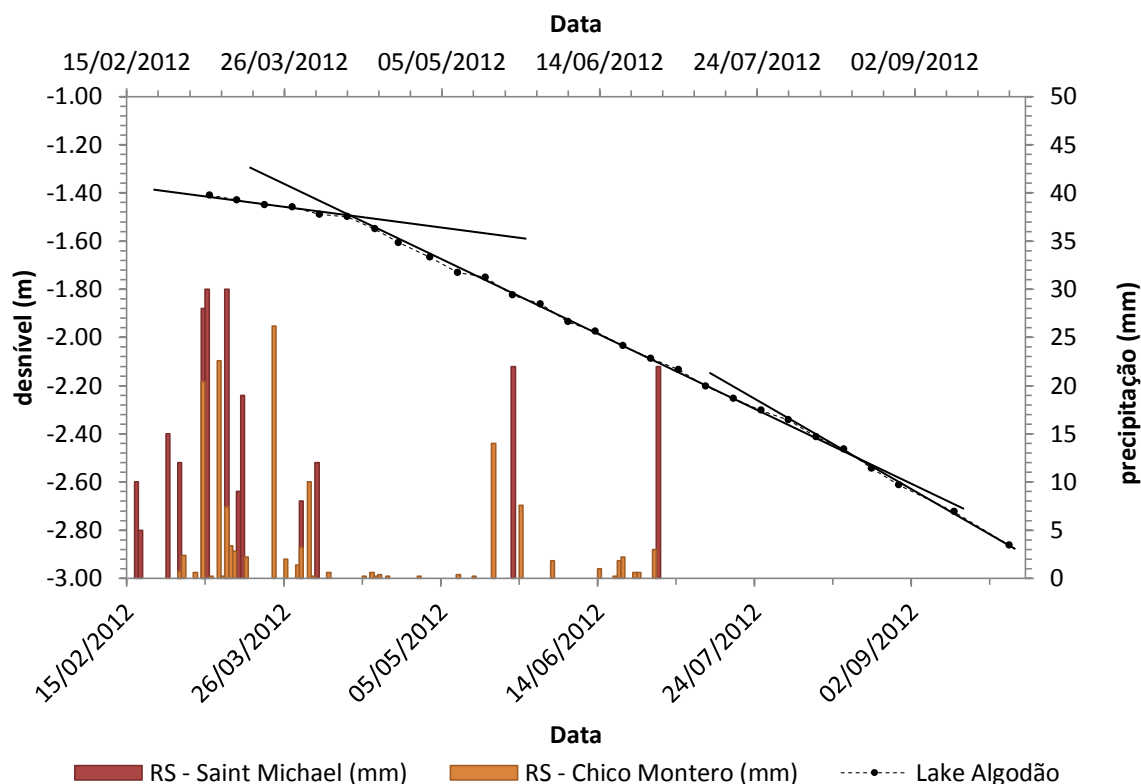


Figura 65 - Curva de rebaixamento do açude do Algodão e pluviometria.

4.3.3.7. Açude Fogareiro

O reservatório Fogareiro teve seu nível monitorado de 15/02/2012 a 12/09/2012, ininterruptamente. No início do monitoramento, o reservatório encontrava-se com 78,52 % de sua capacidade e ao final do monitoramento com 53,84%, uma queda de 24,68% em quase sete meses. A perda de volume durante esse período ocorreu de forma muito irregular, com uma média de 138.000m³/dia; essas perdas correspondem ao somatório de todas as saídas. A área teve uma diminuição média de 18500 m²/dia, o que já não representa uma pequena perda.

O rebaixamento do açude, em termos de nível, ocorreu seguindo três etapas, como indicado pelas linhas de tendência na **Figura 66**. A primeira etapa ocorreu nos

meses de fevereiro à abril, a segunda etapa de abril à agosto e a terceira etapa, com um rebaixamento mais intenso é percebida nos meses de agosto e setembro; a taxa de rebaixamento para o período foi de 9,98 mm/dia. A **Figura 66** apresenta “desnível” como sendo o nível do açude em relação ao seu ponto de sangria. Nessa figura, são mostradas as pluviometrias dos postos mais próximos da região do açude.

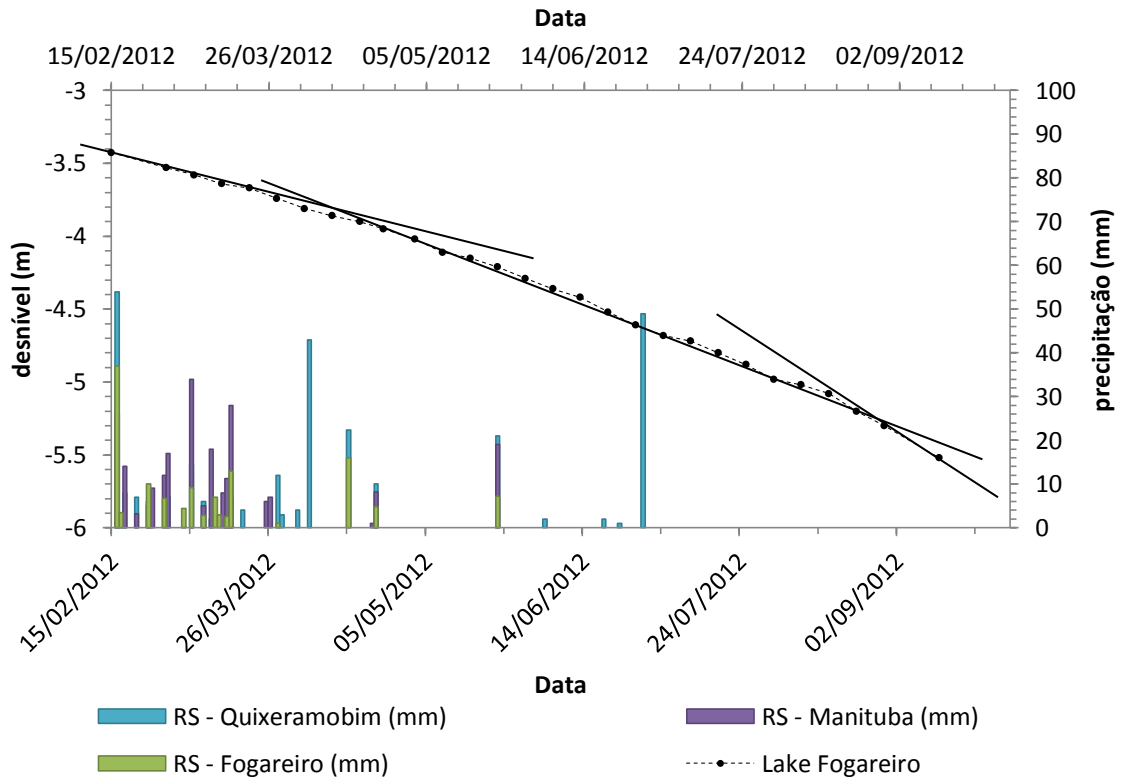


Figura 66 - Curva de rebaixamento do açude do Fogareiro e pluviometria.

4.4. Balanço hídrico e caracterização isotópica

A partir do conhecimento da temperatura média do ar para o período foi possível estimar os valores α e ε , por meio da equação (4); para a temperatura de 28,72 °C, foram obtidos valores de α e ε iguais a 1,0091 e 0,0091, respectivamente.

Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ para os sete açudes variaram de açude para açude, com desvios em relação a média de 1,10‰ (**Figura 67**) observado principalmente para os açudes do Cambito e da Lagoa Cercada. Esses dois açudes distam de apenas 5km. A diferença entre os valores de $\delta^{18}\text{O}$ medidos nestes dois açudes em 15/02/2012 foi de 2,65‰. Essa grande diferença pode ser devido a influência das características geomorfológicas do reservatório sobre a assinatura isotópica da água ou mesmo uma diferença entre os microclimas de cada açude. Tal diferença pode ser ocasionada por intrusões subterrâneas no açude do Cambito ou uma grande diferença entre as taxas de evaporação dos açudes. A **Figura 67** mostra a média dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ dos sete açudes para cada dia de amostragem. Apesar de poder se observar um bom ajuste linear $R^2 = 0,94$, é notória a flutuação nos valores mostrada pela barra de erro, indicando variação espacial de $\delta^{18}\text{O}$.

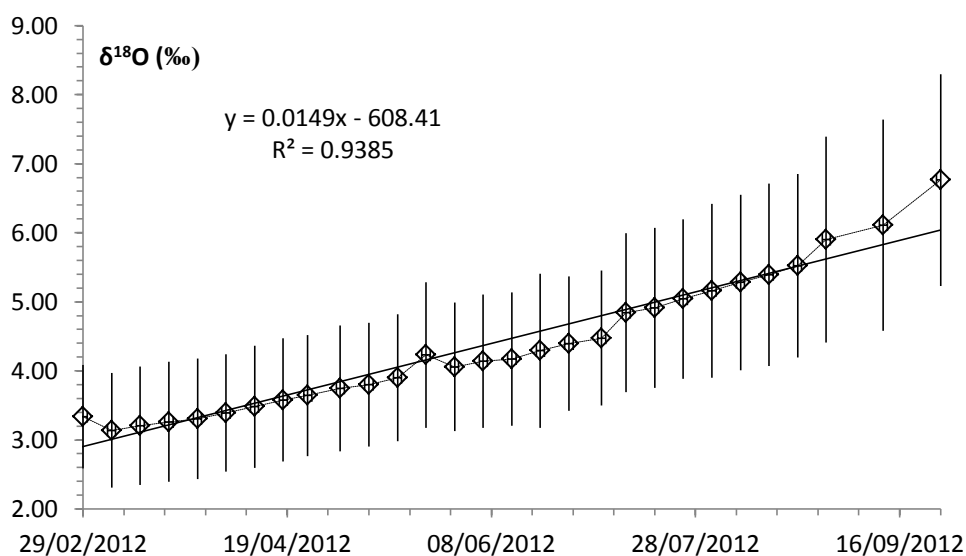


Figura 67 - Média dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ dos sete açudes.

A análise mostrada na **Figura 67** só traz conclusões significativas se considerarmos que, para o mesmo intervalo de tempo, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ de todos os açudes deveriam ter valores muito próximos. Isso indicaria que a variação no tempo dessa variável seria muito mais significativa do que a sua variação com o nível/volume ou mesmo que sua variação espacial, o que não pode ser concluído apenas com esses dados. Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ dos sete reservatórios concordam devido às condições de volume e nível em que os açudes se encontravam no início do estudo (**Tabela 23**); no início do período de estudo, se encontravam com valores de f muito próximos, acima de 50%, à exceção do açude da Vista Alegre.

Tabela 23 – Valores de f (fração do volume de água remanescente no reservatório) e de $\delta^{18}\text{O}$ no início das coletas.

Reservatório	Data de início	$f_0(\%)$	$\delta_0^{18}\text{O}$
Fogareiro	15/02/2012	78,52	2,45
Lagoa Cercada	15/02/2012	71,70	4,80
Cambito	15/02/2012	62,20	2,15
Riacho Verde	15/02/2012	61,35	3,53
Algodão	07/03/2012	77,71	1,78
Vista Alegre	11/07/2012	41,71	6,36
Campina	15/02/2012	63,25	3,08

Um dos elementos que podem indicar diferenças entre as taxas de evaporação é a variação de $\delta^{18}\text{O}$ no tempo, a taxa de variação isotópica (TVI). Açudes com grandes TVI sugerem grandes fracionamentos e, portanto, taxas de evaporação mais intensas. Dentre os sete açudes, o que apresentou uma maior TVI foi o da Vista Alegre, com média de 9,02‰/ano. Para os dois açudes vizinhos, Lagoa Cercada e Cambito, os valores médios obtidos foram de 5,81‰/ano e 6,84‰/ano, respectivamente. Em detrimento dos mais diferentes valores iniciais de $\delta^{18}\text{O}$ desses dois açudes, os valores de TVI ficaram muito próximos, indicando que os açudes, possivelmente, evaporam sobre condições semelhantes. Já os açudes que tiveram os menores valores de TVI foram do Algodão, Riacho Verde e Fogareiro com 2,66‰/ano, 3,14‰/ano e 3,25‰/ano, respectivamente. Com exceção do açude da Campina, com TVI de 6,72 ‰/ano, é possível perceber que os açudes com menor capacidade e menor bacia hidráulica tiveram os maiores TVI, devido a relação entre a composição isotópica do reservatório e a fração de água perdida por evaporação. O gráfico da variação temporal da composição isotópica é mostrado na **Figura 68** onde os valores diários de TVI foram obtidos a partir da média entre os

valores diários de TVI dos açudes. As barras de erro mostram a grande diferença entre os valores de TVI diários dos açudes, mas é possível perceber a tendência crescente da curva, apesar da fraca correlação, $R^2 = 0,39$. Essa tendência crescente parece estar ligada com o fim das chuvas na região.

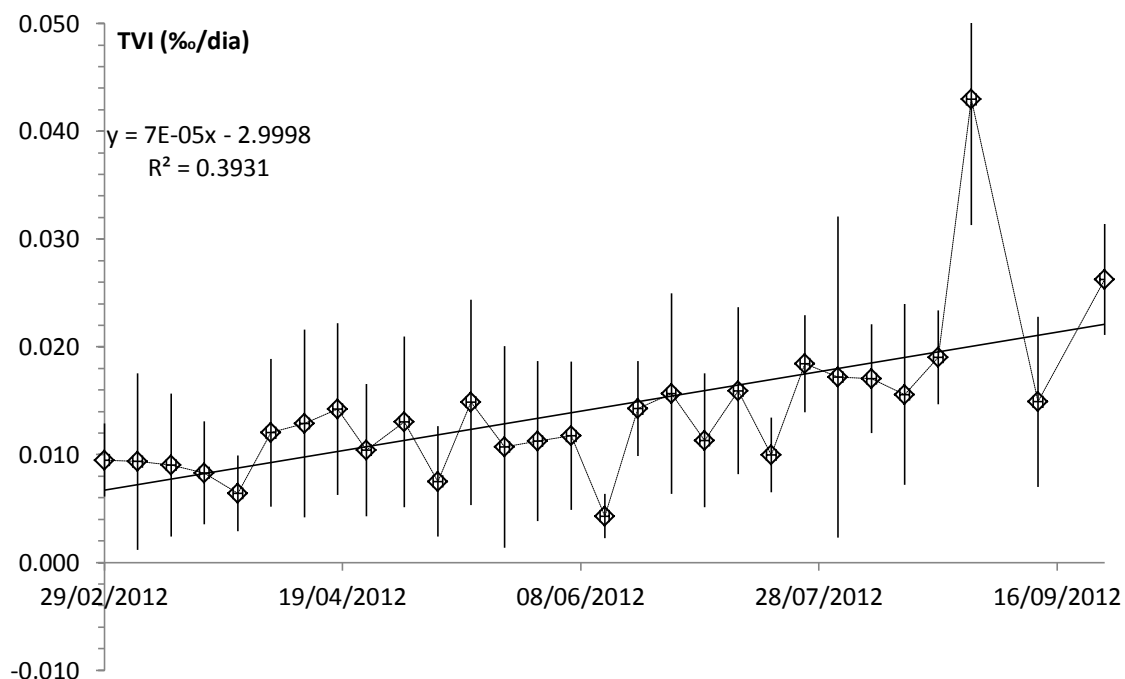


Figura 68 – Média das TVI do açudes para o período de coleta.

Os valores de z na equação (3c), otimizados nesse estudo, mostram erros da ordem de 10^{-3} para todo intervalo, ou seja, de -12‰ à -10‰ , que dificultou a escolha de um valor ótimo que fosse fisicamente coerente. Porém, com a média dos valores de z para esse intervalo foi possível observar concordância da lâmina evaporada com os valores da literatura para regiões semiáridas (SANTIAGO, 1984; MAYR et al., 2007; FONTES, 2008; COSTA et al., 2010). Os valores de z encontrados por MAYR et al. (2007) para dois lagos que se encontravam em uma região semiárida, na Argentina, variaram entre 50% e 58%, ou seja, de toda a água perdida pelo reservatório, de 50% a 58% era por evaporação. Para os sete açudes estudados o valor médio de z foi de 64%, um pouco maior do que os valores obtidos por MAYR et al. (2007). Embora a média total seja 64% dos açudes, foram encontrados individualmente valores de 42% a 90% (**Tabela 24**). Apesar dos valores de z descreverem bem a relação entre a água perdida por evaporação e a água perdida

pelas demais saídas é necessário uma análise da lâmina evaporada para obter conclusões precisas sobre a água perdida nesse processo, uma vez que as retiradas por bombeamento e as perdas por infiltração são diferentes para cada reservatório.

A média total das lâminas evaporadas para cada reservatório e seu desvio em relação a média foram de 4,95 mm e 1,04 mm, respectivamente. Esse valor se aproxima dos valores que temos para regiões semiáridas utilizando métodos isotópicos. Para fins de comparação temos o trabalho de Costa et al.(2010) que estimou para o reservatório de França, localizado no semiárido Baiano, uma taxa de evaporação de aproximadamente 3,7 mm/dia. Já Santiago (1984) em seus estudos nos açudes Pereira de Miranda (CE) e Caxitoré (CE) encontrou valores médios que iam de 3,2 mm/dia à 5,0 mm/dia. Esse valor também concorda com os valores encontrados por Fontes et al. (2004), que foram de 2,65 mm/dia à 4,75 mm/dia para açudes da região da bacia experimental do rio Cedro (BA). A **Tabela 24** mostra os valores médios e os desvios de z, a taxa de lâmina evaporada média e a taxa de rebaixamento médio.

Tabela 24 - Relação dos açudes, e valores médios de z, taxa de rebaixamento (ΔH) e taxa de lâmina evaporada (\bar{E}).

Açude	($\bar{z} \pm \sigma$) (%)	ΔH (mm/dia)	($\bar{E} \pm \sigma$)(mm/dia)
Fogareiro	42 \pm 6	9,98	4,16 \pm 0,63
Lagoa Cercada	90 \pm 13	7,08	6,38 \pm 0,89
Cambito	81 \pm 13	6,97	5,63 \pm 0,93
Riacho Verde	48 \pm 9	9,20	4,40 \pm 0,81
Algodão	41 \pm 5	7,16	2,92 \pm 0,39
Vista alegre	92 \pm 11	7,03	6,50 \pm 0,78
Campina	54 \pm 10	8,97	4,81 \pm 0,91

Os desvios encontrados para os valores médios de E são devido aos valores atribuídos a δa . Durante o período em que se estendeu esse estudo, nenhum dos reservatórios chegou a rebaixar mais do que 50% em relação ao seu valor inicial, e foi impossível manter seguro um tanque classe A, não permitindo uma boa precisão do valor de δa o que atribuiu uma incerteza maior à taxa evaporativa. Contudo, comparando os valores da **Tabela 24** com os valores de outros estudos para regiões semiáridas é possível perceber uma consistência nos resultados. Na **Tabela 24** é possível perceber diferenças marcantes entre os valores de \bar{E} , que decorre das

diferentes geomorfologias sob as quais os reservatórios estão sujeitos, bem como do microclima gerado pela presença dos próprios reservatórios.

Em termos de avaliação mensal dos valores de lâmina evaporada, é possível verificar homogeneidade entre os reservatórios, (**Figura 69**). Para fins de comparação, foram usados os valores da estação automática do INMET que usa para o cálculo da lâmina evaporada, o método do evaporímetro de Pichê; foram usados os valores de lâmina evaporada mensal dos meses de fevereiro à agosto. O mês de setembro não foi monitorado pela estação. Os valores dessa estação mostraram valores de 285 mm, em fevereiro, e 424 mm, em agosto. Para todos os meses, os valores de lâmina evaporada da estação do INMET superaram os valores obtidos de lâmina evaporada pelo método isotópico, em cerca de 100 mm. Quando se observa a lâmina evaporada mensal mês a mês é observado um crescimento tendencial no valor da lâmina evaporada. Entre os reservatórios, a diferença em nível mensal diminui. Existe uma hegemonia entre os valores de lâmina evaporada mensal, salvo para os reservatórios da Lagoa Cercada, Cambito, e Vista Alegre. Para esses três reservatórios o valor da lâmina evaporada teve os maiores valores dentre o grupo amostrado.

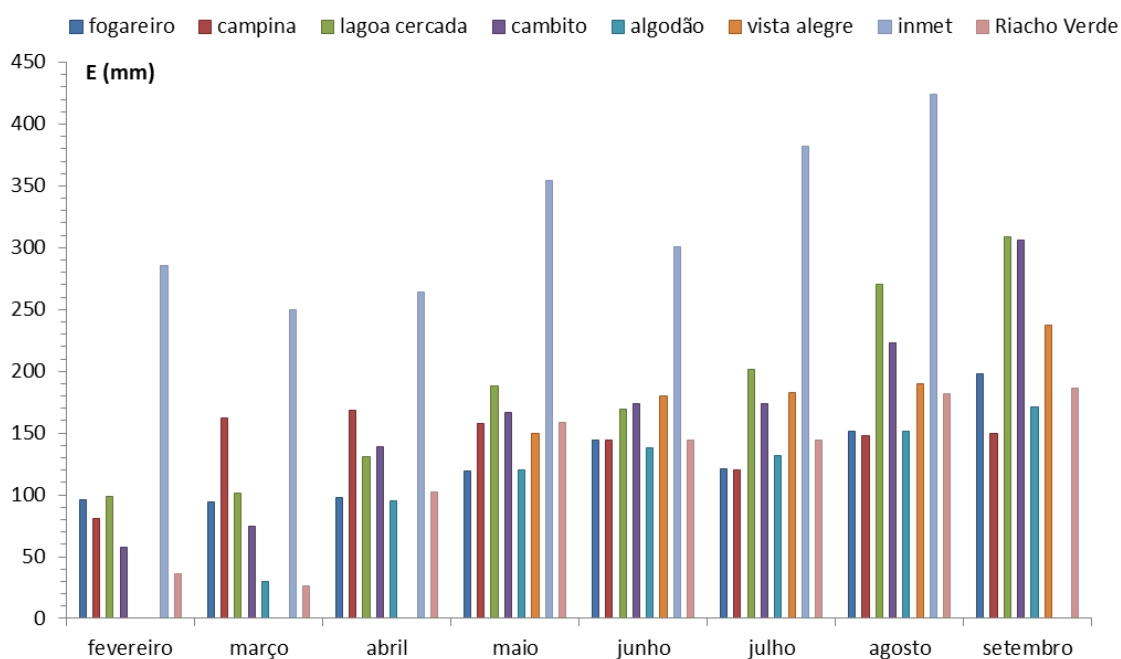


Figura 69 - Lâmina evaporada mensal para cada um dos sete reservatórios estudados.

Comparando os valores de lâmina evaporada obtidos nesse estudo com as características morfométricas dos açudes foi possível verificar questões relevantes: Em termos de lâmina evaporada acumulada mensal, foi observado que os reservatórios com menores bacias hidráulicas tiveram as maiores lâminas evaporadas, o que demonstrou a alta fragilidade desse recurso ao processo de evaporação, não só em termos do percentual de água que é evaporado nesse processo, mas em relação à altura da lâmina que é evaporada. Em termos de classificação e agrupamento, tomando como base a lâmina evaporada média diária para o período, podemos separar os reservatórios em três grupos: (i) açudes Fogareiro, Riacho Verde e Campina formam o grupo com a lâmina evaporada média entre 4 e 5,0 mm, (ii) os açudes Lagoa Cercada, Cambito e Vista Alegre formam o grupo com lâmina evaporada entre 5 e 7 mm, (iii) o açude do Algodão representa sozinho um grupo com lâmina entre 2 e 3 mm. Vale ressaltar que dentre os reservatórios estudados, o açude do Algodão apresenta sua bacia hidráulica coberta, quase em sua totalidade, por macrófitas.

A relação entre a lâmina evaporada e os parâmetros morfométricos estudados não mostraram qualquer relação, claramente mostrado quando comparamos os açudes da Lagoa Cercada e do Riacho Verde. Esses dois têm características geomorfológicas similares, tanto em termos do relevo dos entornos como em abertura do vale; mas, em termos lâmina evaporada ficaram em grupos distintos.

5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos conclui-se que a otimização utilizando vários métodos é uma metodologia válida para parâmetros que podem alterar significativamente os valores das variáveis de saída; contudo, essa abordagem deve ser justificada com uma análise de sensibilidade.

A otimização de parâmetros para as relações cota/volume e cota/área mostraram que existe uma diferença entre os parâmetros otimizados para cada uma das relações e que um reservatório deve ser caracterizado levando-se em consideração dois pares de valores obtidos; no caso de simplificações, deve-se utilizar funções objetivos que considerem essa dualidade na otimização. Essa medida é importante já que dependendo do objetivo do estudo pode-se necessitar dar prioridade ao uso da profundidade e da área ou do volume e da profundidade.

O cálculo da lâmina evaporada obtido a partir dos valores das variáveis climáticas conhecidas, inserem erros devido a não individualização do reservatório.

A individualização dos reservatórios se mostrou essencial para seu estudo, quanto a sua geomorfologia, ou quanto seu microclima.

Os resultados obtidos para os parâmetros geomorfológicos estudados indicam que reservatórios com capacidades diferentes podem ter características geomorfológicas semelhantes, como é o caso dos reservatórios Lagoa Cercada e Riacho Verde o que pode trazer um sério problema para medidas simplificadoras de estimativa de volume de pequenos reservatórios, acarretando em superestimação dos resultados.

Os valores de lâmina evaporada obtidos mostraram que diferentes reservatórios evaporam de forma diferente, podendo essa diferença chegar em 50%.

Não foi possível achar qualquer relação entre os valores de lâmina evaporada e os parâmetros geomorfológicos. A única relação lógica observada entre esses estudos independentes é que os reservatórios de menor bacia hidráulica tiveram os maiores valores de lâmina evaporada. Contudo, não é possível afirmar que pequenos reservatórios evaporam maiores lâminas devido a pequena quantidade de reservatórios amostrados.

Os valores de lâmina evaporada se mostraram muito sensíveis às variações de δa o que ficou evidente nos desvios encontrados.

Finalmente, esse trabalho sugere estudos individualizados de pequenos açudes e do parâmetro δa para o sertão nordestino, pois esta variável é importante para uma melhor caracterização isotópica das águas da região, bem como a diminuição dos erros nos resultados.

6 – REFERÊNCIAS

6. REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. C. DE; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 51, n. 1, p. 157–170, 2006. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1623/hysj.51.1.157>>. Acesso em: 17/6/2012.
- BROCK, B. E.; YI, Y.; CLOGG-WRIGHT, K. P.; EDWARDS, THOMAS W D; WOLFE, B. B. Multi-year landscape-scale assessment of lakewater balances in the Slave River Delta, NWT, using water isotope tracers. **Journal of Hydrology**, v. 379, n. 1–2, p. 81–91, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169409006209>>. .
- BURTE, J. **LES PETITS AQUIFERES ALLUVIAUX DANS LES ZONES CRISTALLINES SEMI-ARIDES: FONCTIONNEMENT ET STRATEGIES DE GESTION. Etude de CAS DANS LE NORDESTE BRÉSILIEN.**, 17. Jun. 2008. Universidade federal do Ceará/Université Montpellier 2. Disponível em: <<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00399714/en/>>. .
- CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. DE C.; MARTINZ, D. D. G.; NASCIMENTO, L. S. V. Contribuições ao Debate Sobre as Eficiências de Pequenos e Grandes Reservatórios. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 31–38, 2003.
- Color LCD GPS/WAAS PLOTTER. Disponível em: <http://www.furuno.com/en/business_product/pdf/marine/gp1650wdf.pdf>. Acesso em: 24/12/2012.
- COSTA, A.; ZUCCHI, M. DO R.; AZEVEDO, A. E. G. DE; SILVA, A. B. DA. Caracterização Isotópica e Estimativa da Evaporação Usando Isótopos Estáveis nos Reservatórios de França e São José do Jacuípe, Região do Semi-árido Baiano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 2, p. 49–58, 2010. Disponível em: <http://www.abrh.org.br/novo/rbrh_completas/RBRHV15N2_Completa.pdf#page=50>. Acesso em: 14/12/2012.
- CRAIG, H.; GORDON, L. I. Deuterium and Oxygen-18 Variations In the Ocean and The Marine Atmosphere. Proceedings of a Conference On Stable Isotopes In Oceanographic Studies and Paleotemperatures. **Anais...** p.9–130, 1965.
- DESCONNETS, J. C.; TAUPIN, J. D.; LEBEL, T.; LEDUC, C. Hydrology of the HAPEX-Sahel Central Super-Site: surface water drainage and aquifer recharge through the pool systems. **Journal of Hydrology**, v. 188–189, n. 0, p. 155–178, 1997. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169496031587>>. .
- EPSTEIN, S.; MAYEDA, T. Variation of O18 content of waters from natural sources. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 4, n. 5, p. 213–224, 1953. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0016703753900519>>. .

FEKETE, B. M.; GIBSON, JOHN J; AGGARWAL, P.; VÖRÖSMARTY, C. J. Application of isotope tracers in continental scale hydrological modeling. **Journal of Hydrology**, v. 330, n. 3–4, p. 444–456, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169406002095>>. .

FILHO, F. S. O Processo de mistura em reservatórios do semi-árido e sua implicação na qualidade da água. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, p. 109–119, 2006. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br:8080/ri/handle/123456789/1986>>. Acesso em: 5/8/2012.

FONTES, A. S. **Vulnerabilidade à salinização das águas superficiais da Bacia do rio Jacuípe por traçadores ambientais**, 2008. Universidade Federal da Bahia.

FONTES, A. S.; ALVARES, D.; MEDEIROS, Y. D. P. Avaliação preliminar da evaporação nos açudes da bacia experimental do rio cedro. ,2004. São Luís: VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste (2004).

GIBSON, J. J. Forest-tundra water balance signals traced by isotopic enrichment in lakes. **Journal of Hydrology**, v. 251, n. 1–2, p. 1–13, 2001. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169401004280>>. .

GIBSON, J. J.; EDWARDS, T W D; PROWSE, T. D. Pan-derived isotopic composition of atmospheric water vapour and its variability in northern Canada. **Journal of Hydrology**, v. 217, n. 1–2, p. 55–74, 1999. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169499000153>>. .

GONFIANTINI, R. Enviromental isotopes in lake studies. In: P. Fritz; J. C. Fontes (Eds.); **Handbook of Environmental Isotope Geochemistry**. p.113 – 165, 1986.

HORITA, J.; WESOLOWSKI, D. J. Liquid-vapor fractionation of oxygen and hydrogen isotopes of water from the freezing to the critical temperature. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 58, n. 16, p. 3425–3437, 1994. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0016703794900965>>. .

HUNT, R. J.; COPLEN, T. B.; HAAS, N. L.; SAAD, D. A.; BORCHARDT, M. A. Investigating surface water–well interaction using stable isotope ratios of water. **Journal of Hydrology**, v. 302, n. 1–4, p. 154–172, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169404003580>>. .

INMET. sítio do INMET. Disponível em: <www.inmet.gov.br>. Acesso em: 19/3/2013.

JEŻOWSKI, J.; BOCHENEK, R.; ZIOMEK, G. Random search optimization approach for highly multi-modal nonlinear problems. **Advances in Engineering Software**, v. 36, n. 8, p. 504–517, 2005. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0965997805000475>>. Acesso em: 23/6/2012.

JONES, M. D.; IMBERS, J. Modeling Mediterranean lake isotope variability. **Global and Planetary Change**, v. 71, n. 3–4, p. 193–200, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092181810900157X>>. .

JONSSON, C. E.; LENG, M. J.; ROSQVIST, G. C.; SEIBERT, J.; ARROWSMITH, C. Stable oxygen and hydrogen isotopes in sub-Arctic lake waters from northern Sweden. **Journal of Hydrology**, v. 376, n. 1–2, p. 143–151, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169409004144>>. .

KATTAN, Z. Estimation of evaporation and irrigation return flow in arid zones using stable isotope ratios and chloride mass-balance analysis: Case of the Euphrates River, Syria. **Journal of Arid Environments**, v. 72, n. 5, p. 730–747, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014019630700273X>>. .

KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. **Science (New York, N.Y.)**, v. 220, n. 4598, p. 671–80, 1983. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17813860>>. Acesso em: 3/3/2012.

LEWIS, S. environmental isotope balance of kinneret as a tool in evaporation rate estimation. **Isotope in lake studies**. p.290, 1979. viena: international atomic energy agency.

LONGINELLI, A.; STENNI, B.; GENONI, L. et al. A stable isotope study of the Garda lake, northern Italy: Its hydrological balance. **Journal of Hydrology**, v. 360, n. 1–4, p. 103–116, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169408003570>>. .

LUERSEN, M. A.; RICHE, R. LE. Globalized Nelder–Mead method for engineering optimization. **Computers & Structures**, v. 82, n. 23-26, p. 2251–2260, 2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045794904002378>>. Acesso em: 18/6/2012.

MAYR, C.; LÜCKE, A.; STICHLER, W. et al. Precipitation origin and evaporation of lakes in semi-arid Patagonia (Argentina) inferred from stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$). **Journal of Hydrology**, v. 334, n. 1–2, p. 53–63, 2007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169406005117>>. .

METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A. W.; ROSENBLUTH, M. N.; TELLER, A. H. Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. **Journal of Chemical Physics**, v. 21, p. 1087 – 1092, 1953.

MOLLE, F. **GEOMETRIA DOS PEQUENOS AÇUDES**. III ed. Recife: SUDENE/ORSTON/TAPI, 1994.

MOLLE, F.; CADIER, E. **Manual do Pequeno Açude**. III ed. Recife: SUDENE/ORSTON/TAPI, 1992.

MORTIMER, C. H. some central questions of lake dynamics. **Isotope in lake studies**. p.290, 1979. viena: international atomic energy agency.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0022169470902556>>. Acesso em: 20/3/2012.

PRICE, K. V.; STORN, R. M.; LAMPINEN, J. A. **Differential Evolution**. 2005.

ROSENBERRY, D. O.; WINTER, T. C.; BUSO, D. C.; LIKENS, G. E. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. **Journal of Hydrology**, v. 340, n. 3-4, p. 149–166, 2007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022169407002053>>. Acesso em: 4/12/2012.

ROZANSKI, K.; FROEHLICH, K.; MOOK, W. G. **Environmental isotopes in the hydrological cycle**. 39th ed. Paris: UNESCO, 2001.

SANTANA, E. W. DE. **CADERNO REGIONAL DA SUB-BACIA DO BANABUIÚ**. Forataleza: INESP, 2009.

SANTIAGO, M. M. F. **Mecanismos de salinização em regiões semiáridas. Estudo dos açudes Pereira de Miranda e Caxitoré no Ceará.**, 1984. Universidade de São Paulo.

SHOURIAN, M.; MOUSAVI, S. J.; TAHERSHAMSI, A. Basin-wide Water Resources Planning by Integrating PSO Algorithm and MODSIM. **Water Resources Management**, v. 22, n. 10, p. 1347–1366, 2007. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11269-007-9229-1>>. Acesso em: 4/1/2013.

SRH. PROJETO SÃO JOSÉ (OBRAS HÍDRICAS) POR MUNICÍPIO. Disponível em: <<http://atlas.srh.ce.gov.br/infra-estrutura/projetosaojose/listaProcessos.php?municipio=Quixeramobim&status=3000>>. Acesso em: 13/7/2012.

STICHLER, W.; MALOSZEWSKI, P.; BERTLEFF, B.; WATZEL, R. Use of environmental isotopes to define the capture zone of a drinking water supply situated near a dredge lake. **Journal of Hydrology**, v. 362, n. 3–4, p. 220–233, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169408004538>>. .

STORN, R.; PRICE, K. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. **Journal of Global Optimization**, v. 11, n. 4, p. 341–359, 1997. Springer Netherlands. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1023/A:1008202821328>>. .

TREMOY, G.; VIMEUX, F.; MAYAKI, S. et al. A 1-year long $\delta^{18}\text{O}$ record of water vapor in Niamey (Niger) reveals insightful atmospheric processes at different timescales. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 8, 2012. Disponível em:

<<http://www.agu.org/pubs/crossref/2012/2012GL051298.shtml>>. Acesso em: 26/10/2012.

TURNER, J. V.; TOWNLEY, L. R. Determination of groundwater flow-through regimes of shallow lakes and wetlands from numerical analysis of stable isotope and chloride tracer distribution patterns. **Journal of Hydrology**, v. 320, n. 3–4, p. 451–483, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169405003616>>. .

TURNER, K. W.; WOLFE, B. B.; EDWARDS, THOMAS W. D. Characterizing the role of hydrological processes on lake water balances in the Old Crow Flats, Yukon Territory, Canada, using water isotope tracers. **Journal of Hydrology**, v. 386, n. 1–4, p. 103–117, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169410001381>>. .

VANDENSCHRICK, G.; WESEMAEL, B. VAN; FROT, E. et al. Using stable isotope analysis (δD – $\delta^{18}O$) to characterise the regional hydrology of the Sierra de Gador, south east Spain. **Journal of Hydrology**, v. 265, n. 1–4, p. 43–55, 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169402000975>>. .

WALTERS, F. H.; PARKER, L. R.; MORGAN, S. L.; DEMING, S. N. **Sequential Simplex Optimization**. 1991.

WHITE, K. L.; CHAUBEY, I. SENSITIVITY ANALYSIS, CALIBRATION, AND VALIDATIONS FOR A MULTISITE AND MULTIVARIABLE SWAT MODEL. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n. 5, p. 1077–1089, 2005. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03786.x>>. Acesso em: 16/3/2012.

YI, Y.; BROCK, B. E.; FALCONE, M. D.; WOLFE, B. B.; EDWARDS, THOMAS W. D. A coupled isotope tracer method to characterize input water to lakes. **Journal of Hydrology**, v. 350, n. 1–2, p. 1–13, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169407006877>>. .